

3100097009218

TUGAS AKHIR**KOMPOSIT**

**ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN KELENTURAN
KOMPOSIT LAMINAT KAYU LAPIS (PLYWOOD)
TERHADAP PERUBAHAN
ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KADAR AIR**

RSM

620.120.287

Ari

2-1

1996



Disusun oleh :

MOCHAMAD YANUAR ARIEF**2193.030.006**

**PROGRAM STUDI DIPLOMA III
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1996**

PERPUSTAKAAN	
Tgl. Terima	22-11-96
Terima dari	H
No. Register	6605

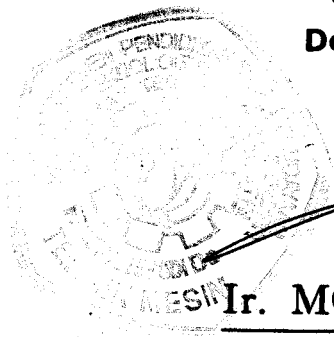
**ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN KELENTURAN
KOMPOSIT LAMINAT KAYU LAPIS (PLYWOOD)
TERHADAP PERUBAHAN
ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KADAR AIR**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Ahli Madya Teknik Mesin
Pada**

**Bidang Studi Manufakturing dan Bahan
Program Studi Diploma III
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
S u r a b a y a**

**Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing**




Ir. MOH. FARID, DEA

NIP. 131 618 502

**S U R A B A Y A
Oktober, 1996**

ABSTRAK

Produk kayu lapis (plywood) memiliki orientasi sudut serat veneer yang saling tegak lurus antara veneer yang satu terhadap veneer berikutnya. Sejauh manakah pengaruh perubahan orientasi sudut serat veneer dan kadar airnya terhadap kekuatan tarik, regangan dan kelenturannya ?

Penelitian terhadap plywood dilakukan terhadap material tripleks dengan tinjauan tripleks sebagai material komposit laminat. Material diuji tarik dan bending untuk mendapatkan besarnya tegangan tarik dan bending. Kemudian dilakukan analisis melalui perhitungan untuk dibandingkan dengan hasil pengujian. Dalam penelitian ini disajikan delapan perbedaan orientasi sudut serat dan tujuh perbedaan kadar air.

Hasilnya didapatkan bahwa peningkatan kadar air akan menurunkan kekuatan material terhadap pembebanan bending, menaikkan kekuatan tarik dan regangan sampai kadar air antara 28% dan 32%, dan setelah itu akan turun lagi. Selain itu perubahan orientasi sudut kayu lapis akan menurunkan kekuatan tarik dan bending. Dari alternatif orientasi sudut laminat yang disajikan terlihat bahwa orientasi sudut terbaik untuk pembebanan tarik dan bending dicapai oleh laminat 0/90/0.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil Alamin, segala puji, pujian dari makhluk kepada makhluk, pujian dari Allah kepada Dzat-Nya, pujian makhluk kepada Allah dan pujian Allah kepada makhluk-Nya adalah semata-mata kepunyaan Allah. Segala puji bagi Allah yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga dapat terselesaikannya Tugas Akhir ini. Sholawat dan salam semoga selalu terlimpah kepada junjungan kita, Baginda Rasulullah saw.

Tugas Akhir dengan judul "ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN KELENTURAN KOMPOSIT LAMINAT KAYU LAPIS (PLYWOOD) TERHADAP PERUBAHAN ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KADAR AIR" ini merupakan salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Muda (Ahli Madya) di Program Studi Diploma III Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tugas Akhir ini merupakan bagian penelitian dari tim peneliti Dosen Program Studi Diploma III Teknik Mesin ITS.

Rasa terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah berperan dan membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Terima kasih penulis sampaikan kepada :



1. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir,
2. Bapak Ir. Eddy W. M Sc selaku Koordinator Tugas Akhir,
3. Bapak DR. Ir. Soeharto, DEA selaku Ketua Program Studi Diploma III Teknik Mesin,
4. Bapak Ir. Jamalludin Harahap selaku Koordinator Penelitian, Asistan Manager Quality control PT NUSANTARA PLYWOOD, Gresik,
5. Bapak Edy Kustanto, Mas Inun, Mas Edi, Mbak Kustriasih, Mbak Ami Warsini selaku staff Quality Control Plywood, PT NUSANTARA PLYWOOD, Gresik,
6. Bapak Kasnari selaku staff PT NUSANTARA PLYWOOD Gresik beserta Ibu,
7. Seluruh keluargaku, Bapak, Ibu, Mas Udin, Mas Ivan, Rully, Vidha dan Emak tersayang serta Pakde Lutfi sekeluarga atas bantuan spirit dan materi yang telah mereka berikan,
8. Om Syahlan Simamora dan Tante atas segala bantuan yang telah diberikan,
9. Rekan-rekan kost, Jalil, Narno, Afir, Ade, Pak Suyanto, Farid, Harjanto, Ferdi, Huda, Didik, Sulis dan Cak Nur atas segala bantuan yang diberikan,
10. Rekan-rekan DIII Teknik Mesin, Zamroni, Denny, Rovani, Topik, Basuki, Sufan, Fauzi, Amri, Hargyan dan rekan yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu,
11. Rekan-rekan Jamiyyatul Huda, Mas Zainudin, Abi

Hanifah, Mbak Al, Cak Mustofa, Sunaryo, Yana, Yanti, Iyud, Mas Heri, Arif Lukman rekan-rekan lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu,

12. Rekanku Singgih, Evi Masida, Erdiana Dwi Hestiningrum yang baik, Sulaiman, Sutikno (Ka. KM Teknik Mesin, UGM), serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga Allah membalas semua kebaikan mereka.

Penelitian ini memang jauh dari kesempurnaan. Untuk itu layak kiranya bila saran dan kritik akan penulis terima dengan lapang dada untuk perbaikan selanjutnya. Semoga bermanfaat untuk siapa saja yang memerlukan.

Gresik, 17 September 1996

P e n u l i s

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.2.1. Permasalahan	3
1.2.2. Pembatasan Masalah	4
1.3. Tujuan	5
1.4. Manfaat	5
1.5. Metodologi Penelitian	5
1.6. Sistematika Penulisan	8
 BAB 2 DASAR TEORI	 10
2.1. Pengenalan Material Komposit	10
2.2. Material Komposit Kayu	11
2.3. Pengenalan Material Plywood	15
2.4. Proses Produksi Material Plywood	17
2.4.1. Bahan Baku	19
2.4.2. Logpond / Logyard	20
2.4.3. Log Selection	20
2.4.4. Log Cutting	21
2.4.5. Rotary Lathe Green Veneer	21
2.4.6. Dryer veneer	22
2.4.7. Core Selection, Core Builder (Composer) dan veneer Selection	22

2.4.8. Glue Spreader	23
2.4.9. Pengepresan	24
2.4.10. Sanding	26
2.5. Perilaku Makromekanik Laminat	27
2.5.1. Pengenalan	27
2.5.2. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Plane Stress pada Material Orthotropy.	28
2.5.3. Hubungan Antara Tegangan dan Regangan pada Lamina yang Mempunyai Arah Berubah-Ubah	31
2.5.4. Resultan Gaya dan Momen pada Laminat .	33
2.5.5. Analisis Lamina dan Laminat Terhadap Perubahan Suhu dan Kadar Air	36
2.5.6. Perhitungan Regangan dan Kelenturan Higrothermal	40
2.5.7. Macam-Macam Susunan Laminat terhadap Permukaan Tengahnya	44
 BAB 3 METODE PENELITIAN	 47
3.1. Perlengkapan Pengujian	47
3.1.1. Bahan Baku dan Spesifikasinya	47
3.1.2. Peralatan Penunjang	48
3.2. Mesin Uji Yang Dipergunakan untuk Masing-Masing Pengujian	48
3.3. Proses Pembuatan Spesimen Uji	49
3.3.1. Kebutuhan Spesimen Uji	49
3.3.2. Persiapan Bahan	51
3.3.3. Pengerjaan Spesimen	55
3.3.4. Pemotongan	56
3.3.5. Pengampelasan	57
3.4. Pengujian	57
3.4.1. Kadar Air dan Dimensi Spesimen	57
3.4.2. Pelaksanaan Pengujian	59
3.4.3. Perhitungan Kekuatan	60

BAB 4	PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	62
4.1.	Data	62
4.2.	Hasil Pengujian	62
4.2.1.	Pengujian Tarik	64
4.2.2.	Hasil Pengujian Bending	68
4.2.3.	Temperatur Rata-Rata Pengujian	74
4.3.	Hasil Perhitungan Makromekanik	75
4.3.1.	Perhitungan Matriks Stiffness, Reduced Stiffness, Matriks A, Matriks B, Matriks D dan Invers Masing-Masing Matriks ...	75
4.3.2.	Analisis Pengaruh Higrothermal terhadap Lamina	82
4.3.3.	Analisis Pengaruh Higrothermal terhadap Lamina Perubahan Orientasi Sudut	85
4.3.4.	Resultan Gaya yang Terjadi pada Uji Tarik	90
4.3.5.	Perhitungan Momen yang Terjadi pada Bending	94
4.3.6.	Perbandingan Regangan dan Kelengkungan Teoritis dan Hasil Pengujian	100
BAB 5	DISKUSI	123
BAB 6	KESIMPULAN DAN SARAN	130
DAFTAR PUSTAKA	132
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar	1.1. Flow chart metodologi penelitian	7
Gambar	2.1. Flow chart proses produksi plywood	19
Gambar	2.2. Susunan plywood	24
Gambar	2.3. Asumsi pelat tipis	29
Gambar	2.4. Orientasi sudut serat	31
Gambar	2.5. Jarak dari bidang tengah	35
Gambar	2.6. Kelengkungan akibat beban	42
Gambar	2.7. Laminat simetri	45
Gambar	2.8. Laminat asimetri	46
Gambar	2.9. Laminat quasi isotropik	46
Gambar	3.1. Dimensi spesimen uji tarik	51
Gambar	3.2. Spesimen uji bending	51
Gambar	3.3. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$	53
Gambar	3.4. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$	54
Gambar	3.5. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$	54
Gambar	3.6. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$	55
Gambar	3.7. Arah pemotongan plywood pengujian tarik	56
Gambar	3.8. Arah pemotongan plywood pengujian bending	57
Gambar	4.1. Tegangan tarik 1	101
Gambar	4.2. Tegangan tarik 2	102
Gambar	4.3. Tegangan bending 1	103
Gambar	4.4. Tegangan bending 2	104
Gambar	4.5. Perbandingan regangan tarik laminat $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$	107
Gambar	4.6. Perbandingan regangan tarik laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$	108

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Kekuatan kayu basah dan kering.....	13
Tabel 2.2.	Ukuran log yang dipotong sesuai Keperluan Plywood.....	21
Tabel 2.3.	Tekanan yang diberikan sesuai ukuran plywood.....	25
Tabel 2.4.	Standart tekanan hot press sesuai ukuran plywood.....	25
Tabel 4.1.	Hasil pengujian tarik (laminat $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ dan $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$).....	64
Tabel 4.2.	Hasil pengujian tarik (laminat $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ dan $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$).....	65
Tabel 4.3.	Hasil pengujian tarik (laminat $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$ dan $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$).....	66
Tabel 4.4.	Hasil pengujian tarik (laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$ dan $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$).....	67
Tabel 4.5.	Hasil pengujian bending (laminat $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ dan $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$).....	69
Tabel 4.6.	Hasil pengujian bending (laminat $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ dan $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$).....	70
Tabel 4.7.	Hasil pengujian bending (laminat $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$ dan $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$).....	71
Tabel 4.8.	Hasil pengujian bending (laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$ dan $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$).....	72
Tabel 4.9.	Hasil perhitungan regangan rata-rata bending I.....	73
Tabel 4.10.	Hasil perhitungan regangan rata-rata bending II.....	74
Tabel 4.11.	Temperatur spesimen uji.....	74
Tabel 4.12.	Perubahan SG dari kadar air.....	83
Tabel 4.13.	Konstanta ekspansi higroskopis.....	83
Tabel 4.14.	Koefisien ekspansi panas.....	84

Gambar 4.7.	Perbandingan regangan tarik laminat -45°/90°/45°	109
Gambar 4.8.	Perbandingan regangan tarik laminat -30°/90°/30°	110
Gambar 4.9.	Perbandingan regangan tarik laminat 90°/0°/90°	111
Gambar 4.10.	Perbandingan regangan tarik laminat -60°/0°/60°	112
Gambar 4.11.	Perbandingan regangan tarik laminat -45°/0°/45°	113
Gambar 4.12.	Perbandingan regangan tarik laminat -30°/0°/30°	114
Gambar 4.13.	Perbandingan kelengkungan laminat 0°/90°/0°	115
Gambar 4.14.	Perbandingan kelengkungan laminat -60°/90°/60°	116
Gambar 4.15.	Perbandingan kelengkungan laminat -45°/90°/45°	117
Gambar 4.16.	Perbandingan kelengkungan laminat -30°/90°/30°	118
Gambar 4.17.	Perbandingan kelengkungan laminat 90°/0°/90°	119
Gambar 4.18.	Perbandingan kelengkungan laminat -60°/0°/60°	120
Gambar 4.19.	Perbandingan kelengkungan laminat -45°/0°/45°	121
Gambar 4.20.	Perbandingan kelengkungan laminat -30°/0°/30°	122

Tabel 4.15. Perubahan temperatur kayu	85
Tabel 4.16a. Koefisien thermal dan higroskopis lamina	88
Tabel 4.16b. Koefisien thermal dan higroskopis lamina	89
Tabel 4.17. Gaya akibat pembebanan	91
Tabel 4.18. Gaya thermal dan higroskopis	92
Tabel 4.19. Gaya thermal dan higroskopis (lanjutan)..	93
Tabel 4.20. Gaya total	95
Tabel 4.21. Gaya total (lanjutan)	96
Tabel 4.22. Momen thermal dan higroskopis.....	97
Tabel 4.23. Momen total.....	98
Tabel 4.24. Momen total (lanjutan).....	99
Tabel 4.25a. Perbandingan regangan dan kelengkungan.	105
Tabel 4.26b. Perbandingan regangan dan kelengkungan.	106
Tabel A Densitas kayu.....	Lampiran 2
Tabel B Jenis-jenis cacat kayu.....	Lampiran 3

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan pemakaian bahan komposit dewasa ini sangat meluas. Ini disebabkan karena sifat-sifat khusus yang dimiliki oleh bahan komposit tidak dimiliki oleh bahan-bahan non komposit. Jika dilihat dari definisinya, yaitu suatu material kombinasi dari dua bahan atau lebih yang sifatnya berbeda dengan sifat masing-masing bahan asalnya, maka terlihat bahwa struktur komposit cenderung menguntungkan. Sebabnya karena masing-masing bahan pembentuknya akan saling mereduksi sifat-sifat yang buruk dari bahan yang lain.

Kayu merupakan bahan mentah yang sangat tua dalam hal penggunaannya. Material ini merupakan salah satu contoh daripada material komposit. Dilihat dari struktur pembentuknya, maka kayu terdiri dari serat selulose yang berada dalam matriks lignin. Dinding sel terdiri dari lapisan-lapisan sangat halus yang tersusun dari kesatuan-kesatuan berbentuk seperti benang halus dengan nama "micelle". Benang-benang ini tersusun dari molekul-molekul selulose, sehingga dapat dikatakan bahwa dinding sel tersusun dari selulose yang mengandung air, zat asam dan zat arang. Diantara molekul-molekul tersebut terdapat ruangan-ruangan yang sangat kecil dimana air dan bahan-bahan lainnya dapat disimpan. Dengan demikian dapat

dikatakan bahwa dinding sel mengandung air. Sedangkan yang dimaksud dengan bahan-bahan lain di atas adalah apa yang disebut lignin, bahan pewarna, minyak dan bahan-bahan lainnya. Bahan-bahan ini mempunyai pengaruh yang besar terhadap keadaan masing-masing sel. Oleh karena itu, akhirnya juga menentukan mutu dari kayu yang bersangkutan. Selain itu juga tebal dan tipisnya dinding sel juga akan berpengaruh terhadap kekuatan kayu tersebut.

Kayu lapis (PLYWOOD) adalah gabungan dari beberapa veneer (kayu kupasan tipis) yang direkatkan secara kuat dengan glue (lem). Sesuai dengan sifat-sifat material komposit, maka material plywood dikaji secara mikromekanik dan makromekanik. Mikromekanik adalah perilaku bahan komposit yang dipelajari berdasarkan interaksi antara bahan-bahan pembentuknya, seperti interaksi antara serat penguat dan matriksnya, aliran pemindahan tegangan dari serat penguat terhadap matriksnya, ataupun penentuan Modulus Elastisitas bahan-bahan pembentuknya.

Sedangkan makromekanik mengkaji bahan komposit dengan menganggap bahwa bahan bersifat homogen dimana pengaruh bahan-bahan pembentuknya dianalisis berdasarkan sifat-sifat yang tampak secara keseluruhan berdasarkan data-data mikromekanik.

Salah satu kelebihan bahan komposit adalah kemampuan bahan tersebut untuk kuat pada arah tertentu dan dapat dilemahkan sesuai dengan arah yang kita inginkan. Kemampuan seperti ini jelas tidak/kurang dimiliki oleh

bahan-bahan yang lain (non komposit). Pada kayu lapis, pengaturan kekuatan terhadap tegangan dapat dilakukan dengan mengubah orientasi sudut seratnya. Yang dalam hal ini merupakan serat dari masing-masing veneer.

Dari peralatan fabrikasi yang berada di PT NUSANTARA PLYWOOD, memang secara efisiensi proses produksi dan efisiensi dari bahan baku pembentuknya, orientasi sudut veneer yang saling tegak lurus seperti produk yang dihasilkan saat ini adalah baik. Jadi kurang adanya pemanfaatan estimasi secara teoritis tentang sifat mekanis plywood terhadap perubahan sudut seratnya. Kurang adanya pemanfaat produk terhadap pemakaiannya dengan kondisi alam yang ada, maupun kondisi pembebanan yang ada.

1.2. Perumusan Masalah

1.2.1. Permasalahan

Permasalahan yang ada :

1. Pada material plywood tiga lapis, kekuatan plywood terletak pada posisi face dan backnya. Hal ini karena memang kualitas kayu bagian ini lebih baik. Dengan memberikan beberapa alternatif orientasi sudut laminat, kondisi manakah yang terbaik untuk pembebanan tarik dan bending ?
2. Dengan memberikan parameter perubahan kadar air, seberapa besar pengaruhnya terhadap pembebanan tarik dan bending ?
3. Bagaimanakah perbedaan antara hasil pengujian dan perhitungan untuk regangan tarik dan kelengkungan

bendingnya?

1.2.2. Pembatasan Masalah

Berdasarkan keterbatasan peralatan yang ada serta penggunaan peralatan pengujian dan estimasi yang sederhana dengan variabel perubahan orientasi sudut serat dan kadar airnya, serta penyesuaian terhadap proses produksi di PT NUSANTARA PLYWOOD Gresik, maka diadakan pembatasan - pembatasan masalah agar permasalahan tidak meluas.

Pembatasan-pembatasan tersebut adalah :

1. Material kayu adalah dari spesies Meranti Merah / Red Meranti (SHOREA Spec. Div.) dengan jumlah ply sebanyak tiga (face, back dan core).
2. Ketebalan masing-masing ply adalah sama 1 mm dalam perhitungan dan memiliki komposisi yang sama.
3. Ketebalan dan perhitungan lem / glue diabaikan.
4. Susunan dan orientasi sudut serat untuk masing-masing lapisan adalah tetap, lurus dan kontinu.
5. Kondisi kadar air yang berubah-ubah adalah sebagai akibat dari luar, bukan sebagai hasil dari proses dry kayu dari kayu basah ke kayu kering, serta merata pada laminat.
6. Analisis hanya dilakukan secara makromekanik.
7. Spesimen uji dianggap sempurna, sesuai dengan standart.
8. Pengujian tarik dan bending mengabaikan tegangan dalam kayu akibat proses pengeringan, pengeleman dan pengepresan.

1.3. Tujuan

Adapun tujuan penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini, adalah untuk mengetahui dan memahami sejauh mana perubahan parameter perubahan orientasi sudut serat dan kadar air serta temperatur plywood terhadap kekuatan tarik dan kelenturannya. Selain itu dapat pula dilihat seberapa besar perbedaan hasil perhitungan simulasi terhadap keadaan di lapangan.

1.4. Manfaat

Diharapkan setelah tercapai tujuan penulisan Tugas Akhir ini, dapat dilakukan pengestimasian kekuatan dan kelenturan material plywood secara tepat sesuai dengan pemakaiannya. Baik untuk pemakaiannya terhadap tegangan berbagai macam arah, ataupun bermacam-macam tegangan yang terjadi.

Manfaat lain yang mungkin bisa didapatkan adalah dapat ditentukannya kondisi lingkungan yang tepat selama pemakaian plywood. Seberapa besar tumpukan yang bisa diberikan untuk plywood agar tidak terjadi kelengkungan yang mengakibatkan kerusakan pada plywood. Hal lainnya mungkin bisa didapatkan adalah kemungkinan bisa dilakukannya pemeriksaan terhadap kondisi ruang, baik itu tempat untuk menyimpan/storage maupun untuk transport. Karena seringkali terjadi klaim terhadap mutu kayu ekspor yang diterima customer rusak sebelum mereka terima.

1.5. Metodologi Penelitian

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, ada beberapa

tahapan yang harus dilakukan. Dari permasalahan yang ada, menyangkut problem transportasi kayu lapis (utamanya untuk ekspor), terlihat bahwa untuk waktu pengangkutan yang panjang melalui laut, perlu dilakukan pengawasan yang ketat terhadap material plywood tersebut. Baik dari perubahan temperatur, kadar air maupun mikroorganisme yang ada.

Permasalahan yang lain mungkin akan timbul adalah tidak sesuainya pemakaian plywood produksi umum terhadap pemakaian ataupun kelembaban yang terjadi. Dan hal ini tidak selalu menguntungkan.

Karena adanya permasalahan, maka timbul ide untuk meneliti seberapa jauh pengaruh parameter perubahan orientasi sudut serat, kadar air dan temperatur terhadap kekuatan tarik dan kelenturannya.

Untuk pengujian bahan yang berupa pengujian tarik dilakukan tidak berada dalam pabrik karena keterbatasan peralatan yang ada. Pengujian dilakukan di Balai Penelitian dan Pengembangan Industri yang berlokasi di Surabaya.

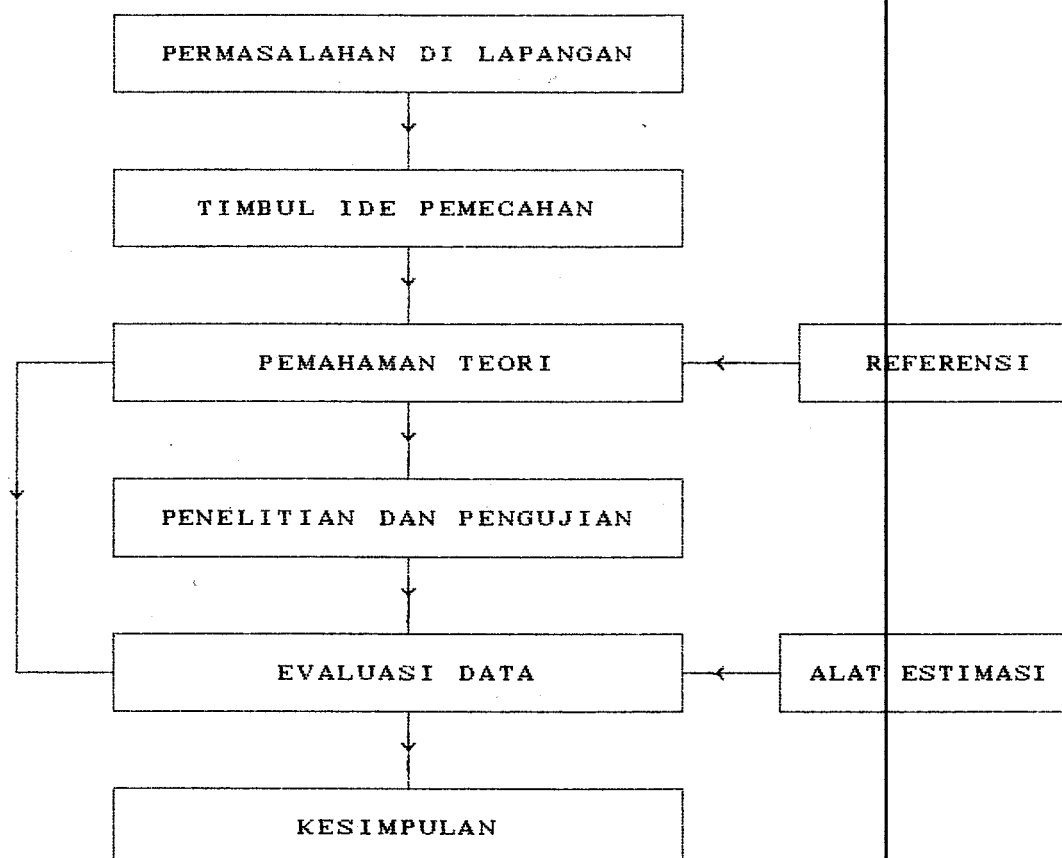
Sedangkan untuk pengujian yang berupa pengujian bending untuk spesimen uji yang kecil dilakukan di anak perusahaan PT NUSANTARA PLYWOOD, yaitu PT NUSAPRIMA PRATAMA INDUSTRY yang bertempat dekat dengan induk perusahaannya, di Jalan Kapten Darmo Sugondo, Indro, Gresik.

Data-data yang terkumpul, adalah berapa besar tegangan maksimal yang diberikan pada material kayu sampai material kayu lapis tersebut mengalami kerusakan (dalam hal ini patah), dikumpulkan dalam suatu tabel

untuk dikalkulasi lebih lanjut. Setelah itu diberikan suatu diskusi yang membahas tentang hal-hal yang mungkin menimbulkan kesalahan selama proses pembuatan spesimen uji serta menemukan alternatif penyelesaian yang lebih baik. Baru kemudian pada akhirnya dapat disimpulkan mengenai apa yang telah dianalisis.

Secara flow chart , metodologi penelitian dapat dilihat pada halaman berikut :

FLOW CHART METODOLOGI PENELITIAN :



Gambar 1.1 Flow Chart Metodologi Penelitian

1.6. Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang penulisan, perumusan masalah sekaligus pembatasannya, tujuan penulisan, manfaat paska penelitian, serta metodologi penelitian dan sistematika penulisan Tugas Akhir.

BAB 2 DASAR TEORI

Berisi tentang pengenalan dan penjelasan tentang bahan komposit, utamanya kayu, prinsip daripada proses produksi material plywood, perilaku makromekanik pada lamina, perilaku makromekanik pada laminat yang di dalamnya terdapat perhitungan secara matriks tentang material komposit.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Di sini dijelaskan mengenai perlengkapan pengujian, proses untuk mempersiapkan spesimen dari awal hingga ke pemotongan dan siap uji, pengujian material berikut perhitungan kekuatan tarik dan kelenturan material plywood.

BAB 4 ANALISIS DATA DAN PENGUJIAN

Berisi tentang penentuan spesimen dan bahannya, hasil pengujian yang dilakukan, dan perhitungan antara sifat-sifat mekanik material kayu lapis berdasarkan data uji.

BAB 5 DISKUSI

Membahas permasalahan yang timbul selama pembuatan spesimen sampai pengujiannya.

BAB 6 KESIMPULAN

Membandingkan antara hasil pengujian di lapangan dengan perhitungan melalui simulasi sederhana sekaligus memberikan kesimpulan tentang korelasi antara reaksi terhadap parameteranya.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. Pengenalan Material Komposit

Material komposit didefinisikan sebagai suatu kombinasi dari dua material atau lebih dalam skala makroskopik yang sifatnya berbeda dari sifat masing-masing bahan mula. Penggabungan dua bahan atau lebih ini diharapkan akan menampilkan sifat-sifat yang baik saja dari masing-masing material pembentuk dan akan mereduksi sifat buruk masing-masing bahan asal. Material yang berbeda dapat dikombinasikan secara mikroskopik, misalkan paduan. Akan tetapi secara makroskopik, paduan tampak seperti suatu benda homogen. Maka paduan bukan termasuk material komposit.

Material komposit memiliki sejarah pemakaian yang sudah lama. Seperti contohnya adalah orang Israel lama yang membuat bata dari lumpur dengan penguatan dari jerami. Contoh lain adalah orang Mesir yang memanfaatkan kayu lapis untuk pembuatan bangunan. Dan contoh yang baru adalah pembuatan material komposit dari matriks resin yang berserat, misalnya Fibre Reinforced Resin Composites yang ringan sekaligus memiliki karakteristik yang baik.

Pada suatu klasifikasi dinyatakan bahwa material komposit terdiri dari empat golongan, yaitu :

1. Agglomerated Materials / Particulate Composites

Pada agglomerated Materials ini, yang dikombinasikan

adalah bahan yang berbentuk butiran dari berbagai macam ukuran dengan suatu bahan yang berfungsi untuk merekatkan masing-masing bahan butiran. Sebagai contohnya adalah beton yang terdiri dari semen, pasir dan kerikil.

2. Laminated Materials / Laminated Composites

Di sini semua bahan akan saling melapisi dan saling menguatkan. Disamping itu, pengaturan kekuatan material jenis ini dapat diatur sesuai dengan kondisi kekuatan masing-masing ply. Sebagai contohnya adalah plywood yang memiliki orientasi sudut serat yang saling menguatkan. Contoh lainnya adalah paduan aluminium (berkarakteristik kuat tetapi kurang tahan terhadap korosi) yang pada permukaannya dilapisi dengan lembaran aluminium yang tahan terhadap korosi.

3. Fibrous Composites

Merupakan material komposit yang banyak dijumpai saat ini. Pada material jenis ini umumnya memiliki komponen yang terdiri dari matriks dan penguat. Penguatan dilakukan sesuai dengan keperluan. Dengan adanya penguatan seperti ini diharapkan material akan tahan terhadap kondisi tegangan tertentu dengan arah tertentu pula. Contoh sederhananya adalah beton bertulang, Laminated Fibrous Composites yang didalamnya termasuk Fibre Glass Reinforced Resin Composites.

2.2. Material Komposit Kayu

Tumbuh-tumbuhan hidup dan tumbuh dengan jalan

mengusahakan sendiri zat-zat yang dibutuhkannya untuk hidup dan pertumbuhannya. Termasuk untuk pertumbuhan kayu, bagian terpenting dan suatu tumbuhan.

Sebagaimana tiap-tiap bahan yang memiliki asal organis, maka kayu tersusun dari sel-sel yang sangat halus. Sebuah sel memiliki bentuk seperti sebuah gelombang memanjang dengan ujung-ujung yang lancip atau sedikit membulat. Dinding sel terdiri dari lapisan-lapisan halus dan tersusun dari kesatuan-kesatuan berbentuk benang yang bernama selulosa. Benang-benang tersebut berbentuk seperti kumparan yang melilit pada dinding sel. Diantara sel-sel tadi terdapat ruangan-ruangan yang berisi zat lignin serta zat lainnya. Karena prosentase selulosa dan lignin yang dominan tadi, maka dapat dikatakan bahwa kayu adalah material komposit dengan komposisi serat selulosa di dalam matriks lignin.

Material kayu jika dipotong secara melintang, dapat dibedakan bagian-bagiannya sebagai berikut :

- a. Hati kayu, terletak di bagian tengah kayu.
- b. Kayu teras adalah bagian yang mengelilingi hati kayu, merupakan bagian kayu gubal yang sudah tidak menjalankan fungsinya lagi.
- c. Kayu gubal, masih aktif untuk pertumbuhan.
- d. Kambium, mengelilingi kayu gubal yang berfungsi untuk membentuk sel-sel baru.
- e. Kulit kayu.

Kayu gubal umumnya dianggap kurang bermutu dibandingkan kayu teras, baik dari segi kekuatan maupun segi keawetannya. Ini disebabkan karena kayu teras masih

memiliki unsur-unsur untuk pertumbuhan, oleh itu masih banyak mengandung air dan makanan yang sewaktu-waktu bisa dikonsumsi mikroorganisme maupun serangga.

Kayu yang akan diolah terlebih dahulu harus dikeringkan sampai kadar air tertentu. Umumnya untuk pengeringan sebagai bahan plywood diadakan sampai kadar airnya 12 % untuk kemudian diproses lebih lanjut. Pengeringan dapat dilakukan dengan mesin oven secara pemanasan sampai suhu tertentu atau dengan cara angin-angin yang dalam hal ini kayu dibiarkan di tempat terbuka secara alami.

Kadar air kayu berhubungan dengan kekuatannya. Dalam buku petunjuk "Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia" tahun 1961, perbandingan menurut Gardner dan Newlin/Wilson dinyatakan bahwa kekuatan kayu basah (kadar air lebih dari 30 %) dan kekuatan kayu kering (kadar air kurang dari 24 % - 30 %) adalah sebagai berikut :

Properti	Gardner	New./Wil.
Proportional Bending Strength	74 %	54 %
Ultimate Bending Strength	89 %	70,5 %
Modulus of Elasticity (Bending)	87,5 %	83 %
Proportional Crushing Strength	--	62 %
Ultimate Crushing Strength	77 %	57,5 %

Tabel 2.1 Kekuatan kayu basah dan kering

Kayu yang memiliki kadar air tertentu akan mengalami penyusutan sesuai dengan kadar air yang dimiliki. Kayu

kering akan memuai jika ia menjadi basah dan akan menyusut bila mengering. Ini berarti bahwa ukuran kayu itu berubah, baik dalam arah radial, tangensial (transversal pada veneer) maupun aksial (longitudinal pada veneer). Akan tetapi besar penyusutan tersebut tidaklah sama. Rata-rata penyusutan kayu terhadap pengeringan hingga kondisi kayu kering (kurang dari 12 %) adalah sebagai berikut :

- * Penyusutan ke arah tangensial : 6 %
- * Penyusutan ke arah aksial : 0,05 %
- * Penyusutan ke arah radial : 3 %

Seperti apa yang disampaikan di atas, bahwa dinding sel terdiri dari benang-benang selulose yang melilit sumbu panjang sel sehingga terlihat seperti kumparan. Diantara benang-benang ini terdapat ruangan yang sangat halus, sedangkan benang-benang itu letaknya hampir sejajar satu sama yang lain. Dan pada hakikatnya karena benang-benang itu tidak teratur rapi, maka perbedaan-perbedaan itu antara satu sama yang lain akan menimbulkan perbedaan terhadap sel itu sendiri dan daya serapnya terhadap air.

Permukaan benang selulose yang memiliki kemampuan untuk menyerap atau melepaskan air. Jadi kesimpulannya kalau sepotong kayu kering menjadi basah, ini berarti bahwa benang-benang selulose itu menarik air dan sebagai akibatnya benang-benang itu akan memuai. seperti logikanya seutas tali / benang kering yang kemudian dibasahi, maka akan lebih banyak memuai dalam arah melebar / kesamping daripada ke arah panjangnya.

2.3. Pengenalan Material Plywood

Kayu lapis atau plywood adalah suatu bahan padat yang berbentuk papan yang terdiri dari susunan veneer kayu yang disusun secara bersilangan dengan arah serat yang saling tegak lurus dari sebuah veneer ke veneer berikutnya. Veneer-veneer tersebut disatukan dengan suatu perekat melalui proses tekanan dan suhu yang tinggi. Mengingat hasil produksi yang nantinya akan dipasarkan, baik untuk ekspor maupun lokal, maka pembuatan plywood haruslah baik dari segi estetika maupun kualitas produknya. Dari luar haruslah tampak sempurna dan tanpa cacat sehingga tidak mengganggu proses pemasaran. Kalau nantinya ada suatu cacat, maka sebisa mungkin untuk dihilangkan.

Pada dasarnya pembagian kayu lapis terdiri dari beberapa macam, yang antara lain :

1. Jenis kayu lapis menurut cara pembuatannya

Menurut cara pembuatannya, kayu lapis terdiri dari tiga macam, yaitu :

a. Comiman / Ordinary Plywood

Adalah kayu lapis biasa, yang mana veneernya merupakan hasil pengupasan secara rotary cutting.

b. Fancy Plywood

Merupakan kayu lapis indah yang veneernya didapatkan dengan cara sliced dan half rotary cut.

c. Particle Board

Merupakan kayu lapis yang mana terdapat bagian veneernya yang berupa limbah kayu gergajian (serbuk kayu gergajian) hasil proses sawmill. Serbuk

gergajian ini direkatkan dengan perekat khusus.

- d. Selain itu juga ada jenis lain yang veneernya merupakan sisa hasil pemotongan plywood (potongan samping) yang direkatkan satu sama lain. Produk ini umumnya terdiri dari tujuh plies.

2. Jenis kayu lapis menurut penggunaannya terdiri dari :

a. Thin Plywood

Dipergunakan untuk door skin, overlay dan cut slice.

b. Thick Plywood

Dipergunakan untuk concert panel, flooring dan block board yang masing-masing dipergunakan untuk lantai bangunan dan mebel.

3. Jenis kayu lapis menurut macamnya :

- a. Papan Block adalah kayu lapis dengan intinya yang terdiri dari lembaran papan (lumber core).
- b. Fancy Plywood adalah kayu lapis dengan lapisan luar yang indah.
- c. Prevernish Plywood merupakan kayu lapis yang lapisan veneer luarnya diberi pengkilap khusus yang transparan.
- d. Overlay Plywood adalah kayu lapis yang bagian face/mukanya diberi kertas bercorak atau formika.
- e. Fire Resistan Plywood adalah kayu lapis memiliki bahan tahan api pada permukaannya sehingga dapat tahan terhadap bahaya kebakaran.
- f. Two Plies Plywood adalah kayu lapis dengan dua lapisan.
- g. Grooved Plywood adalah kayu lapis yang diberi

garis-garis atau alur.

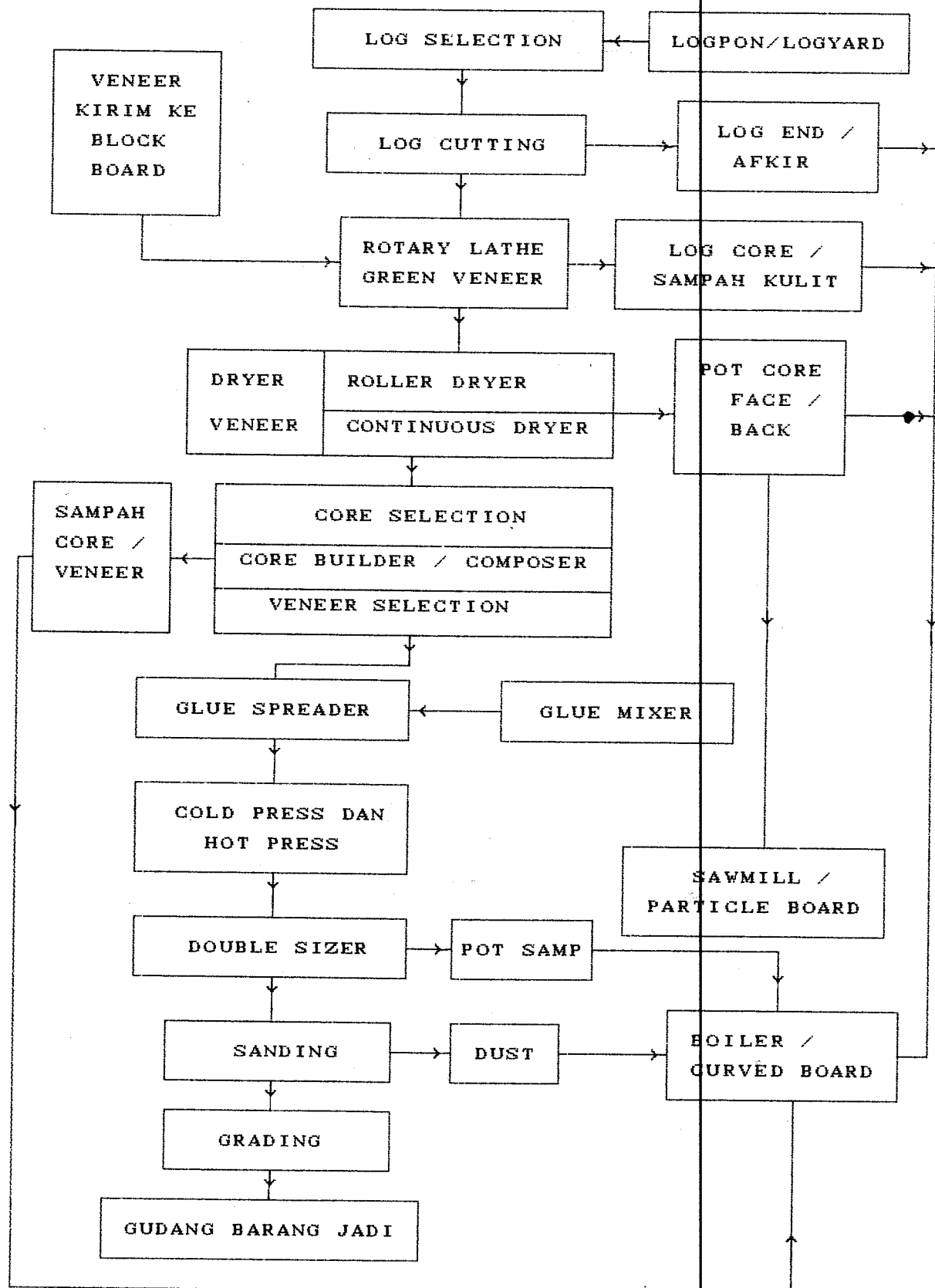
- h. Preserved Plywood merupakan kayu lapis yang diberi bahan pengawet sehingga tahan terhadap serangan jamur, cuaca dan dapat tahan lama.

Selain beberapa contoh produk yang telah disajikan tadi, masih ada beberapa jenis plywood lain yang tidak disebutkan di sini dikarenakan keterbatasan data yang ada. Untuk pemakaian yang bermacam-macam untuk jenis plywood yang bermacam-macam pula bila penggunaan sesuai dengan kriteria plywood produk ,maka dapat dipastikan bahwa plywood tersebut akan dapat bertahan lama. Disamping itu perlu diperhatikan kondisi lingkungan. Misalkan untuk plywood yang dipergunakan untuk eksterior bangunan sudah barang tentu akan berbeda dengan yang dipakai untuk interiornya.

2.4. Proses Produksi Material Plywood

Proses produksi plywood mencakup beberapa langkah yang kesemuanya perlu diperhatikan secara seksama untuk menghasilkan suatu produk berkualitas. Mulai dari proses pemilihan bahan baku plywood, pengupasan, pengeringan, penyusunan sesuai dengan kebutuhan, pengeleman, pengepresan, baik dingin maupun panas, pemotongan samping sampai pada akhirnya berupa pendempulan dan penghalusan permukaan dapat dilihat dalam sebuah Flow Chart sebagai berikut :

FLOW CHART PROSES PRODUKSI PLYWOOD



Gambar 2.1 Flow Chart Produksi Plywood

2.4.1. Bahan Baku

Bahan baku yang dipergunakan untuk produksi plywood adalah berbagai jenis kayu yang ditebang dari hutan-hutan di Indonesia. Kayu-kayu ini diangkut ke lokasi pabrik melalui kapal dengan jadwal tertentu. Ada pula pengiriman yang dilakukan melalui udara. Misalnya untuk kayu yang memiliki berat ringan atau massa jenis yang ringan. Balsa contohnya. Pembongkaran kayu dilaksanakan di dua tempat, dimana kayu yang tenggelam di air (ulin) akan dibongkar di pelabuhan untuk selanjutnya diangkut melalui darat. Sedangkan kayu-kayu yang ringan akan dilewatkan melalui air menuju ke Logpond atau Logyard yang berada di bagian belakang pabrik (tepi laut). Penyediaan kayu dari pihak logistik dilaksanakan sesuai dengan pesanan.

Sebelum pengiriman maupun saat pembongkaran di kapal, dilakukan pemeriksaan, pengukuran dan penggolongan terhadap kayu olah. Hal ini mencakup :

a. Jenis kayu

Jenis-jenis kayu yang pernah masuk ke perusahaan ini umumnya kayu lokal, seperti Binuang, Meranti, Kamper, Kapur, Terentan ataupun kayu-kayu yang lain.

b. Dimensi kayu yang meliputi :

Diameter kayu

maksimal : 100 cm

minimal : 60 cm

Panjang minimal kayu adalah 6 meter

Volume kayu

c. Keadaan fisik kayu

Keadaan fisik kayu inilah yang paling berperan dalam

pemilihan kayu untuk produksi plywood, terutama untuk bagian face dan backnya. Secara fisik harus tampak baik dan bila dimungkinkan cacat kayu yang kecil diletakkan di bagian luar. Selain itu juga perlu diperhatikan mengenai cacat-cacat yang lain agar dalam proses pembuatan plywood tidak terjadi pembuangan yang besar.

2.4.2. Logpond / Logyard

Logpond / Logyard merupakan tempat penampungan kayu sementara setelah diturunkan dari kapal. Tempat ini berupa kolam untuk mempermudah transportasi kayu secara manual. Pemindahan kayu yang berupa balok-balok panjang dilakukan secara manual (didorong oleh manusia maupun ditarik dengan peralatan mesin).

2.4.3. Log Selection

Dari Logpond diadakan grading lagi untuk menentukan pilihan terhadap kebutuhan kayu sesuai dengan pesanan. Dengan peralatan chain conveyor, perjalanan dilanjutkan menuju ke Log Cutting. Di sini kesemua jenis kayu dicocokkan dengan pesanan yang diminta dari customer, sekaligus diberikan tanda untuk pemotongan sesuai dengan yang dibutuhkan. Keadaan fisik kayu inilah yang perlu diperhatikan. Macam-macam cacat kayu yang tidak boleh dipakai untuk bahan baku produk disajikan dalam lampiran.

2.4.4. Log Cutting

Di tempat ini diadakan pemotongan terhadap kayu tersebut. Selain itu juga dilakukan pemeriksaan sekali lagi terhadap kondisi kayu. Ada kemungkinan terjadi kerusakan terhadap kayu akibat terendam terlalu lama, dimakan hewan-hewan laut, karena benturan-benturan atau karena sebab yang lain.

Pemotongan dilakukan dengan Chain saw sesuai dengan ukuran produk yang diinginkan.

No.	Ukuran Plywood	Ukuran log
1.	4' x 8'	102'
2.	4' x 7,5'	96'
3.	4' x 7'	90'
4.	4' x 6'	78'
5.	3' x 7'	90'
6.	3' x 6'	78'
7.	4' x 8'	52'
8.	3' x 7'	40'

Tabel 2.2 Ukuran log yang dipotong sesuai keperluan

2.4.5. Rotary Lathe Green Veneer

Pada bagian ini berfungsi mengupas kayu gelondongan (log) menjadi lembaran-lembaran yang bernama veneer. Pengaturan ketebalan pengupasan dilakukan dengan handle. Outputnya berupa gulungan veneer pada suatu roll yang sudah terpasang reeling pada tepi-tepinya. Pengupasan tidak boleh dilakukan sampai ke hati kayu.

Hasil veneer yang mendekati hati kayu dipergunakan untuk core karena lapisan ini memang kurang baik, baik dari segi kekuatan maupun keindahannya. Sisa-sisa veneer yang kecil bisa sebagai bahan bakar boiler, sedangkan sisa yang agak besar masuk ke sawmill untuk bahan baku pembuatan Particle Board.

2.4.6. Dryer Veneer

Dryer digunakan untuk mengeringkan green veneer. Dryer ini memberikan uap panas bertekanan. Tekanan uap panas yang diberikan adalah 10 kg/cm^2 dengan suhu 150° C . Uap dihasilkan dari boiler. Diharapkan veneer yang keluar memiliki kadar air antara 10 % - 13 %.

Pengendalian kadar air diatur dengan pengendalian perputaran roller. Kecepatan roller ditambah jika kayu veneer terlalu kering dan dikurangi jika kadar air veneer output terlalu kering. Kecepatan roller diatur dengan handel yang berada di tempat operator. Pengambilan sampel veneer yang telah keluar dari dryer dilakukan secara kontinu untuk mempertahankan kondisi akhir veneer yang cocok.

2.4.7. Core Selection, Core Builder (Composer) dan Veneer Selection

Hasil dryer yang sudah terseleksi berupa core dipilih lagi untuk diperbaiki. Untuk veneer core dengan kerusakan yang parah dapat langsung masuk boiler. sedangkan yang agak baik diperbaiki dengan menjahitnya di bagian tepi. Prinsip kerja mesin composer cukup

sederhana, yaitu dengan cara menempelkan benang nilon bersama lem untuk menjaga agar core tidak pecah lebih lanjut. Sudah barang tentu pada hasilnya nanti tidak akan terlihat karena memang posisi core berada di tengah.

Untuk kerusakan di tengah dilakukan penyambungan dengan gumed tape (sejenis isolasi kertas) dan nanti pada akhirnya harus disembunyikan. Ada bagian unit kerja yang bertugas menempelkan gumed tape ini. Posisi penempelan gumed tape ini untuk hasil yang baik adalah tegak lurus terhadap retakan.

Hasil veneer-veneer diatur sedemikian hingga masing-masing veneer saling tegak lurus satu sama lain. Potongan-potongannya sudah disesuaikan saat keluar dari dryer.

2.4.8. Glue Spreader

Pembuatan ramuan perekat dilakukan di glue mixer. Diaduk sehingga merata dan diperiksa kekentalannya, berat jenis, dan kadar airnya. Pengadukan dilakukan kurang lebih selama 15 menit. Bahan baku lem adalah ULOID / UREA plus, Tepung Anggrek (untuk industri), air, dan beberapa bahan lain yang diaduk secara merata dengan temperatur kamar.

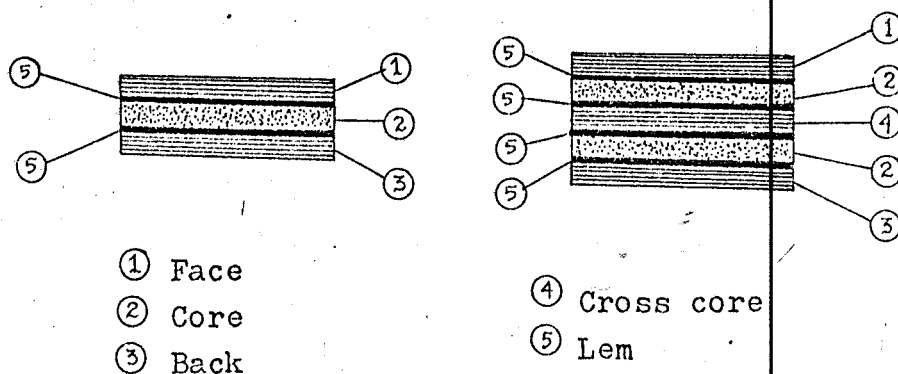
Perekat tadi dialirkan ke glue spreader dan diratakan pada masing-masing permukaan core dengan suatu mekanisme tertentu. Keluarnya berupa tumpukan dengan posisi telah direkatkan seperti saat masuknya.

2.4.9. Pengepresan

a. Cold Press

Selanjutnya dilakukan penekanan terhadap tumpukan plies. Tujuannya agar lem dapat meresap masuk ke pori-pori secara merata sekaligus meratakan kondisi veneer. Penekanan dilakukan dengan tumpuan sebesar permukaan veneer. Besar tekanannya adalah 150 kg/cm^2 temperatur kamar, lamanya sekitar 10 sampai 20 menit.

Pemasukannya sudah dilakukan dengan penumpukan terlebih dahulu, dengan penumpukan sesuai dengan pada saat keluar dari mesin komposer.



Gambar 2.2 Susunan Plywood

No.	Ukuran Plywood	Tekanan Hidrolik (kg/cm^2)		
		NORMAL	MAKS	MIN
1.	4' x 8'	132	150	130
2.	4' x 7'	116	130	110
3.	4' x 6'	100	110	90
4.	3' x 7'	80	100	80
5.	3' x 6'	76	90	70

Tabel 2.3 Tekanan yang diberikan
sesuai ukuran plywood

b. Hot Press

Agar perekatan terjadi secara sempurna, diadakan pengepresan ulang yang disertai dengan pemanasan. Pemanasan yang diberikan memanfaatkan uap dari boiler. Tekanan uap sebesar 1 kg/cm^2 dengan suhu sebesar 110°C . Besar tekanan adalah 150 kg/cm^2 . Standart tekanan hot press yang telah ditentukan adalah sebagai berikut :

No.	Ukuran	Tekanan (kg/cm^2)
1.	3' x 6'	83
2.	3' x 7'	118
3.	4' x 7'	127
4.	4' x 7,5'	136
5.	4' x 8'	144

Tabel 2.4 Standart Tekanan Hot Press
sesuai ukuran plywood

2.4.10. Sanding

Sanding merupakan rangkaian proses perbaikan plywood, yaitu pendempulan dan pengampelasan.

a. Pendempulan

Dilakukan untuk menutupi beberapa kerusakan yang tampak. Kerusakan-kerusakan ini ditutup dengan dempul yang warnanya sama atau mendekati warna face atau back. Pendempulan ini digunakan untuk menutup macam-macam kerusakan yang sifatnya masih kecil dan masih bisa ditutupi. Misalkan lubang yang terjadi akibat serangga, mata kayu, retakan-retakan akibat proses, atau sebab-sebab lain yang sifatnya masih ringan.

b. Sandering (Pengampelasan)

Pengampelasan dilakukan dengan mesin sandering yang mengampelas untuk satu sisi. Dimulai dari grade yang kasar sampai yang halus secara bertahap. Kehalusan dapat diatur sesuai dengan permintaan.

2.5. Perilaku Makromekanik Lamina

2.5.1. Pengenalan

Dasar suatu struktur komposit laminated materials adalah lamina yang umumnya berisi konfigurasi matriks dan serat. Untuk melakukan analisis terhadap material komposit, dapat dilakukan pada kondisi serat yang berbeda-beda. Misalkan pada kondisi serat acak, woven fiber ataupun kontinu seperti apa yang akan dianalisis.

Material komposit adalah heterogen secara makro dengan properti yang mungkin saja bisa berubah-ubah dari satu titik ke titik yang lain. Perhitungan properti masing-masing bahan penyusunnya sekaligus properti awal material komposit adalah termasuk dalam kajian secara mikromekanik. Misalnya mulai dari perhitungan kekuatan tarik material penyusun komposit, Modulus Elastisitas penyusun komposit, Modulus Geser material penyusun komposit ataupun Poisson Ratio material penyusun komposit yang kesemuanya tadi didapatkan dari hasil eksperimen pada matriks pembentuk dan seratnya. Properti mikromekanik ini adalah data perhitungan makromekanik.

Untuk menganalisis secara makromekanik diperlukan properti properti dari material komposit berdasarkan percobaan. Diperlukan properti seperti Modulus Elastisitas Transversal (E_1), Modulus Elastisitas longitudinal (E_2), Modulus Geser (G_{12}), Poisson Ratio (ν_{12}) dan (ν_{21}).

2.5.2. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Plane Stress pada Material Orthotropy¹

Material komposit memiliki banyak karakteristik yang berbeda terhadap material konvensional. Ada beberapa karakteristik yang memiliki kesamaan dengan material konvensional, dan ada pula yang berbeda sama sekali. Untuk material orthotropy ini memiliki hubungan antara regangan dan tegangan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

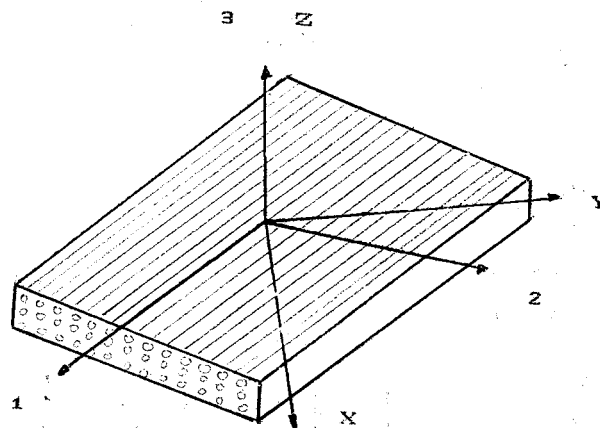
(2.1)

Dapat diperhatikan di sini bahwa tidak terdapat interaksi antara tegangan normal σ_1 , σ_2 dan σ_3 dengan regangan geser γ_{23} , γ_{31} dan γ_{12} . Juga tidak terdapat interaksi antara tegangan geser dan regangan normal serta tidak ada interaksi antara tegangan geser yang satu dengan yang lainnya dengan bidang yang berbeda. Dapat diperhatikan ada sembilan konstanta independent yang terdapat pada material jenis ini.

Pada analisa secara makromekanik lamina, diasumsikan

¹ Gibson, R. F. [1]

bahwa lamina sebagai pelat datar tipis yang terletak pada sumbu X dan sumbu Y (dua dimensi).



Gambar 2.3 Asumsi Pelat Tipis

Antara tegangan dan regangan dihubungkan dengan suatu persamaan matriks. Matriks compliance namanya. Dapat ditulis sebagai berikut :

$$\{\epsilon\} = [S] \{\sigma\} \quad (2.2)$$

Asumsi pada penelitian ini adalah $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$, karena memang kondisi tegangan dan regangan yang dianalisis adalah pada kondisi plane stress (tegangan dan regangan pada satu bidang). Maka dengan matriks Compliance didapatkan hubungan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

dimana :

$$S_{12} = \frac{1}{E_1} \quad (2.4)$$

$$S_{21} = \frac{1}{E_2}$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{-\nu_{21}}{E_2} = \frac{-\nu_{12}}{E_1}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

Atau dalam bentuk yang lain dengan matriks Reduced Stiffness / Matriks Kekakuan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

dimana :

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11} S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \quad (2.6)$$

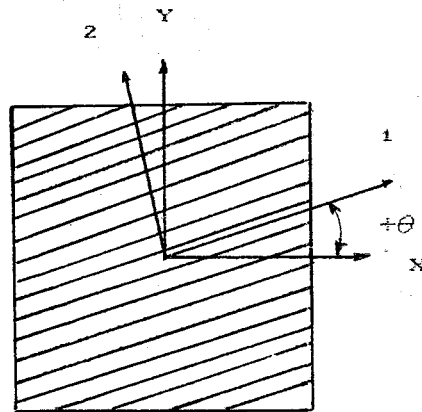
$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11} S_{22} - S_{12}^2} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{S_{12}}{S_{11} S_{22} - S_{12}^2} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} = G_{12}$$

2.5.3. Hubungan Antara Tegangan dan Regangan pada Lamina yang Mempunyai Arah Berubah-ubah²

Hubungan antara tegangan dan regangan pada sub bab di atas hanya berlaku pada pembebanan yang searah dengan orientasi sudut serat. Untuk itu perlu ditransformasikan menjadi arah yang sesuai dengan sumbu yang baru.



Gambar 2.4. Orientasi Sudut Serat.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

serta tegangan pada kondisi longitudinal dan transversal material (sumbu 1 dan 2) adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

² Gibson, R. F. [1]

dimana : $c = \cos \theta$

(2.9)

$s = \sin \theta$

dan :

$$T = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Maka hubungan tegangan dan regangan yang terjadi pada arah yang berubah-ubah jika ditransformasikan secara matriks bentuk laminatnya adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

dimana :

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2 (Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \quad (2.12)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2 (Q_{12} + 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

Dalam alternatif yang lain dapat dipergunakan matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

dimana :

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2 S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \quad (2.14)$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12} (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2 S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2 S_{11} - 2 S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2 S_{22} - 2 S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2 S_{11} - 2 S_{12} - S_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (2 S_{22} - 2 S_{12} - S_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

2.5.4. Resultan Gaya dan Momen pada Laminat³

Resultan gaya dan momen pada laminat diperoleh

³ Gibson, R. F. [1]

dengan mengintegrasikan tegangan dan regangan pada setiap laminat sepanjang ketebalannya. Sehingga akan diperoleh gaya persatuan panjang (N) dan momen persatuan panjang (M) dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{12}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{12}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

dimana :

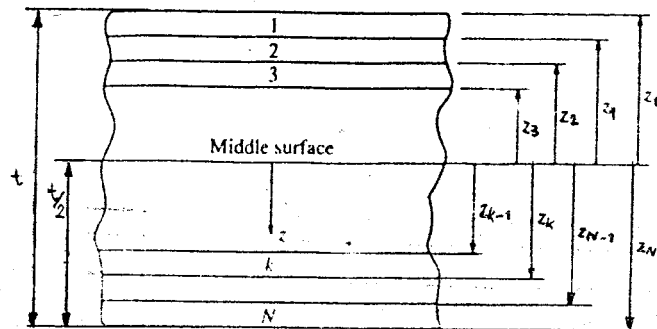
A_{ij} = Matriks kekakuan panjang

$$= \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (2.17)$$

$$= \int_{-t/2}^{t/2} (Q_{ij})_k dz$$

dimana :

z : besarnya jarak antara sumbu tengah laminat dengan permukaan ke k.



Gambar 2.5. Jarak dari Bidang Tengah

B_{ij} = Matriks kekakuan kopel

$$= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.18)$$

$$= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z \, dz$$

D_{ij} = Matriks kekakuan lentur

$$= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2.19)$$

$$= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 \, dz$$

A_{16} dan A_{26} dalam matriks kekakuan panjang A_{ij} mencerminkan kopel antara tegangan normal dan regangan geser atau antara regangan normal dengan tegangan geser yang artinya bila komposit dikenai pembebanan tarik uniaksial ataupun tegangan dengan arah sumbu z maka akan menimbulkan juga regangan geser dan begitu pula sebaliknya. Kondisi itu akan hilang jika susunan serat pada masing-masing lamina adalah α dan $-\alpha$ dengan

ketebalan dan jarak lamina terhadap sumbu tengah adalah sama.

Matriks B_{ij} menunjukkan adanya kopel antara gaya bidang (N_x , N_y , N_{xy}) dengan puntiran (M_x , M_y , M_{xy}) yang berarti apabila komposit diberi gaya bidang pada bidang tengah akan melengkung dan memuntir. Suku ini akan berharga nol apabila susunan serat pada laminat simetri pada bidang tengah sehingga tidak ada kopel antara gaya bidang dan puntiran.

Matriks D_{ij} menunjukkan kopel antara lenturan dan puntiran yang berarti apabila material komposit dikenai beban lentur, maka akan terjadi juga puntiran terhadap bidang tengah dan begitu pula sebaliknya.

2.5.5. Analisis Lamina dan Laminat terhadap Perubahan Temperatur dan Kadar Air

2.5.5.1. Lamina

Pada sub bab terdahulu, hubungan tegangan dan regangan terjadi pada keadaan kondisi lingkungan yang konstan. Jika terjadi perubahan terhadap kadar air dan perbedaan temperatur antara kondisi semula sampai dengan kondisi terjadi pembebanan dan regangan, maka hubungannya disajikan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{bmatrix} \Delta T + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{12} \end{bmatrix} C \quad (2.20)$$

dimana :

- α : Koefisien ekspansi panas (arah sumbu 1 dan 2). ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 ΔT : Perbedaan temperatur ($T - T_0$).....($^{\circ}\text{C}$)
 T : Temperatur akhir.....($^{\circ}\text{C}$)
 T_0 : Temperatur saat $\varepsilon_l^T = 0$($^{\circ}\text{C}$)
 β : Koefisien ekspansi higroskopis
 (arah sumbu 1 dan 2).....(mm/mm)
 C : Kadar air.....(%)

Besarnya koefisien ekspansi panas kayu adalah positif untuk setiap sumbunya, yang berarti bahwa kayu akan mampu untuk memindahkan panas walaupun kecil. Koefisien ekspansi panas akan berbeda dan berubah secara linier terhadap perubahan densitynya. Dalam pengujian terhadap kayu keras dan kayu lunak didapatkan bahwa besarnya koefisien ekspansi panas untuk kayu dengan arah longitudinal (searah serat kayu) mempunyai rata-rata 0,0000017 sampai dengan 0,0000025 per derajat Fahrenheit⁴.

Koefisien ekspansi panas dengan arah radial dan tangensial juga tergantung dari perubahan Specific Gravity. Koefisien ini kurang lebih lima atau lebih dari sepuluh kali besarnya terhadap koefisien dengan searah orientasi serat kayu. Koefisien tersebut besarnya adalah:

$$\alpha_r = [(32) (SG) + 9,9] [10^{-6}] \text{ per } ^{\circ}\text{F} \quad (2.21)^5$$

$$\alpha_t = \alpha_z = [(33) (SG) + 18,4] [10^{-6}] \text{ per } ^{\circ}\text{F}$$

Besarnya koefisien ekspansi higroskopis berbeda-beda

⁴ Wood Handbook [7]

⁵ Wood Handbook [7]

tergantung dari kadar airnya. Jika dijelaskan pengaruhnya adalah bila terjadi perubahan terhadap kadar airnya, maka akan terjadi perubahan terhadap besarnya penyusutan terhadap kayu (yang dalam hal ini diartikan bahwa kondisi awal kayu adalah kayu basah), yang selanjutnya akan memberikan perubahan terhadap besarnya koefisien ekspansi higroskopis.

Besarnya penyusutan terhadap kadar airnya adalah :

$$S_m = S_o [(30 - m) / 30]$$

⁶
(2. 22)

dimana :

S_m : Penyusutan dari kondisi green sampai kadar air
m %

S_o : Penyusutan total sampai kondisi kayu kering.

Setelah didapatkan penyusutan kayu pada masing - masing kadar airnya, maka selanjutnya dapat dihitung besarnya koefisien ekspansi higroskopis. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\beta = \frac{S_m}{M_f \times 100}$$

⁷
(2. 23)

dimana :

M_f : Fiber saturation point, yaitu besarnya kadar air maksimum yang mampu diserap oleh kayu sampai pada kondisi kayu tidak mengalami pemuaian dimensi, dalam hal ini besarnya rata-rata untuk kayu secara umum 28 %.

⁶ Wood Handbook [7]

⁷ Jane and Bodig [9]

Besarnya β_1 dan β_2 didapatkan dengan cara yang sama seperti ini, hanya berbeda dari arahnya saja, yaitu dari arah penyusutannya saja.

2.5.5.2. Laminat

Untuk sudut serat yang berbeda-beda pada laminat menggunakan persamaan yang berbeda dari persamaan untuk perhitungan lamina. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \Delta T + \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} C \quad (2.24)$$

Besar α_x , α_y , α_{xy} didapatkan dari persamaan :

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

dimana :

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

dan : $c = \cos \theta$

$s = \sin \theta$

Demikian juga untuk mendapatkan β_x , β_y dan β_{xy} didapatkan dengan cara yang sama melalui persamaan tersebut di atas.

$$\begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

dimana :

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

dan : $c = \cos \theta$

$s = \sin \theta$.

2.5.6. Perhitungan Regangan dan Kelenturan Higrothermal⁸

Perubahan temperatur dan kadar air akan menimbulkan suatu gaya dan momen yang berasal dari dalam disamping adanya gaya dari luar (akibat pembebanan selama pengujian). Gaya dari luar tersebut adalah gaya tarik dan bending yang masing-masing dibebankan sampai kondisi patah pada benda uji.

Gaya masing-masing pengaruh tersebut dapat dilihat sebagai berikut :

⁸ Gibson, R. F. [1]

- Akibat perubahan temperatur (N^T)

$$N^T = \Delta T \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k \{ \alpha \}_k (z_k - z_{k-1}) \quad (2.28)$$

- Akibat perubahan kadar air (N^M)

$$N^M = C \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k \{ \beta \}_k (z_k - z_{k-1}) \quad (2.29)$$

- Akibat pembebanan tarik searah sumbu x (N_x)

Besarnya adalah sebagai berikut :

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad (2.30)$$

Dan momen yang ditimbulkan oleh masing-masing sebab adalah sebagai berikut :

- Akibat perubahan temperatur (M^T)

$$M^T = \frac{\Delta T}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q})_k \{ \alpha \}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.31)$$

- Akibat perubahan kadar air (M^M)

$$M^M = \frac{C}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q})_k \{ \beta \}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.32)$$

- Akibat pembebanan dari luar untuk bending (M_x)

Terjadi sebagai akibat adanya curvature terhadap sumbu utama pembebanan (sumbu X). Kelengkungan yang terjadi sebagai akibat pembebanan bending diasumsikan hanya terhadap sumbu X karena span searah sumbu Y, jadi juga diasumsikan bahwa tidak terjadi kelengkungan terhadap sumbu Y. Maupun bidang 1 ke arah sumbu 2.

Besarnya adalah sebagai berikut :

$$M_x^B = E f_x \cdot I / (\rho_x \cdot b) \quad (2.33)$$

$$\text{di mana : } E f = 12 / (t^3 \cdot D_{11}) \quad (2.34)$$

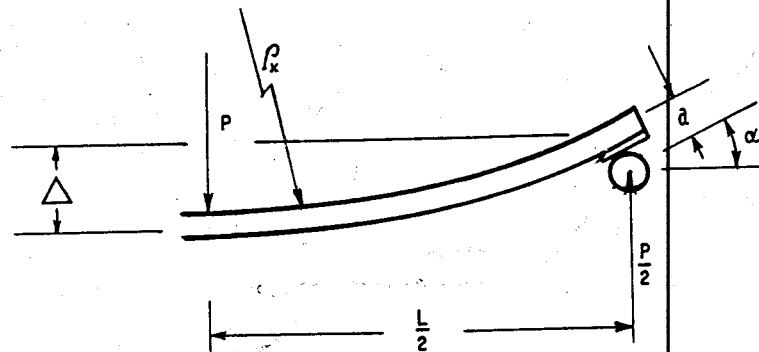
$$I = b \cdot t^3 / 12 \quad (2.35)$$

dan : $E f_x$ = Modulus Flexure sepanjang sumbu Y

I = momen inersia terhadap sumbu tengah

b = Panjang span

t = tebal



Gambar 2.6. Kelengkungan Akibat Bending

Besar kelengkungan dan defleksi akibat pembebanan berdasarkan perhitungan adalah sebagai berikut :

a. Kelengkungan

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} & \bar{D}_{16} \\ \bar{D}_{12} & \bar{D}_{22} & \bar{D}_{26} \\ \bar{D}_{16} & \bar{D}_{26} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \bar{B}_{16} \\ \bar{B}_{12} & \bar{B}_{22} & \bar{B}_{26} \\ \bar{B}_{16} & \bar{B}_{26} & \bar{B}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

yang dalam hal ini :

$$k_x = 1 / \rho_x \quad (2.37)$$

$$k_y = 1 / \rho_y$$

$$k_{xy} = 1 / \rho_{xy}$$

dimana :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x^B \\ M_y^B \\ M_{xy}^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x^M \\ M_y^M \\ M_{xy}^M \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Besarnya matriks invers B_{ij} tidak dapat diketahui (tidak terdefinisikan) karena tidak mempunyai determinan. Jadi untuk pengerjaannya dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

$$[M] = [D][k] + [B][\varepsilon] \quad (2.39)$$

dikerjakan dulu adalah matriks $B_{ij} \times M$:

$$[M] = [B\varepsilon] + [D][k] \quad (2.41)$$

$$[M] - [B\varepsilon] = [D][k] \quad (2.42)$$

dimana :

$$[B\varepsilon] = [B] \times [\varepsilon] \quad (2.43)$$

Selanjutnya adalah :

$$[M - B\varepsilon] = [D][k] \quad (2.44)$$

$$[k] = [D]^{-1} [M - B\varepsilon] \quad (2.45)$$

b. Regangan

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & \bar{A}_{1\sigma} \\ \bar{A}_{12} & \bar{A}_{22} & \bar{A}_{2\sigma} \\ \bar{A}_{1\sigma} & \bar{A}_{2\sigma} & \bar{A}_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} & \bar{B}_{1\sigma} \\ \bar{B}_{12} & \bar{B}_{22} & \bar{B}_{2\sigma} \\ \bar{B}_{1\sigma} & \bar{B}_{2\sigma} & \bar{B}_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x^A \\ N_y^A \\ N_{xy}^A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_x^M \\ N_y^M \\ N_{xy}^M \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Besarnya N_y ada karena pembebanan tarik satu arah dan sesuai dengan sumbu X. Untuk matriks $[k]$, karena tidak terjadi kelengkungan akibat pembebanan tarik, yang dalam hal ini ρ_x dan ρ_y serta ρ_{xy} akan menjadi tak terhingga dan besarnya matriks $[k] = \text{nol}$, karena semua elemen penyusunnya adalah nol.

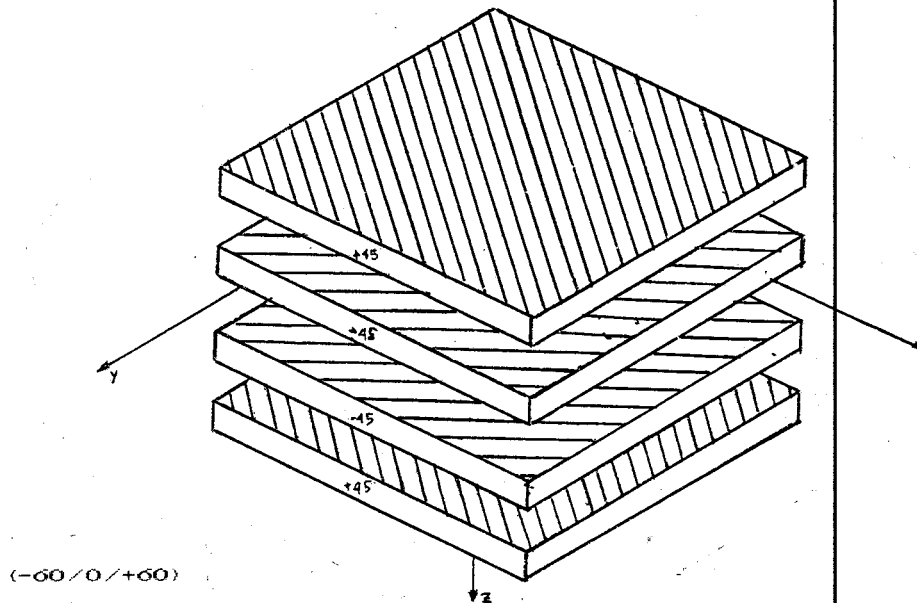
2.5.7. Macam-Macam Susunan Laminat terhadap Permukaan Tengahnya

Berdasarkan pada perbedaan orientasi sudut seratnya, maka material komposit terdiri dari laminat simetri, anti simetri ataupun asimetri terhadap permukaan tengahnya. Laminat "Cross Ply" memiliki orientasi sudut ply selain 0° dan 90° . Dan berdasarkan susunannya laminat cross ply bisa berupa atau asimetri terhadap bidang tengahnya, tetapi bukan anti simetri.

2.5.7.1. Laminat Simetri

Suatu laminat yang simetri memiliki geometri dan properti yang sama terhadap permukaan tengahnya. Laminat jenis ini memiliki material ply, orientasi sudut ply dan ketebalan yang sama terhadap permukaan tengahnya. Nilai z terhadap permukaan tengahnya adalah positif untuk posisi

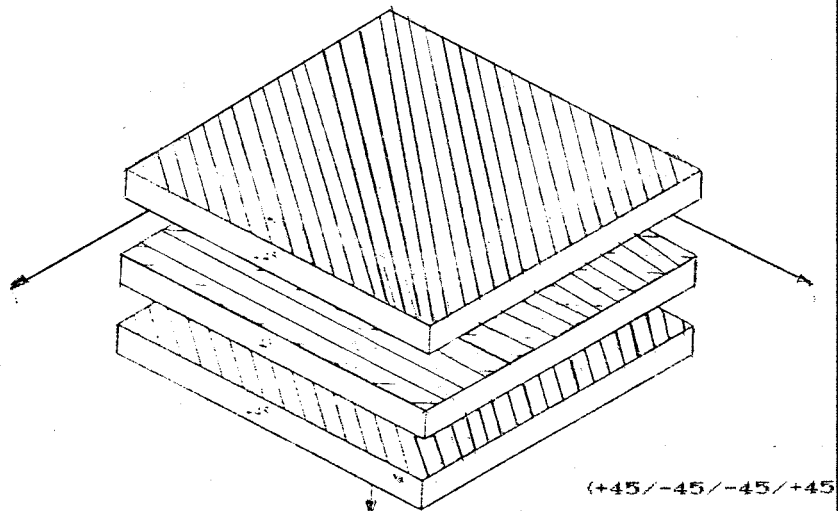
posisi di
tengahnya
etri dapat



Gambar 2.7. Contoh Laminat Simetri

2.5.7.2. Laminat Anti Simetri

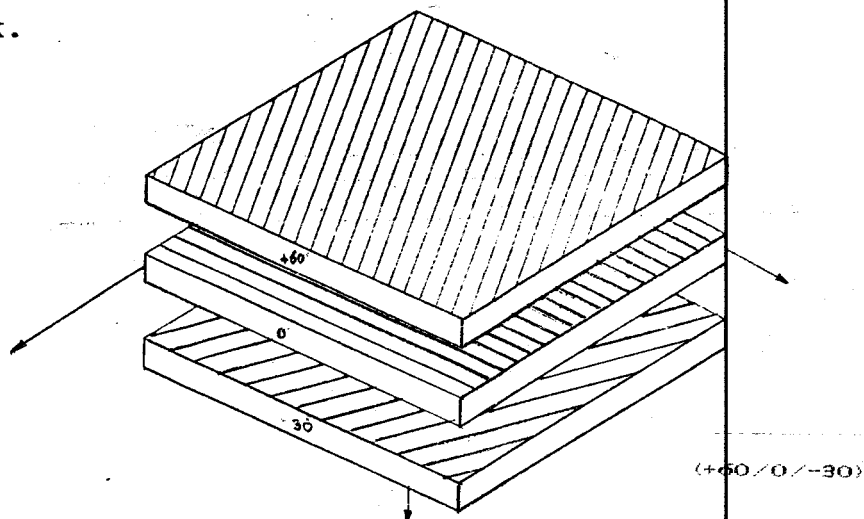
Laminat anti simetri memiliki material yang identik pada bagian atas dan bawah permukaan tengahnya, serta ketebalan yang sama. Akan tetapi orientasi sudutnya yang anti simetri terhadap permukaan tengahnya. Ini berarti bahwa kalau misalnya ada suatu material komposit laminat dengan lamina yang berjarak $+z$ terhadap permukaan tengahnya adalah $+\theta$, maka lamina pada jarak $-z$ bersudut $-\theta$. Ini juga bukan berarti laminat cross ply, tetapi harus selain simetri ataupun asimetri.



Gambar 2.8. Contoh Laminat Asimetri

2.5.7.3. Laminat Quasi Isotropik

Walaupun kelihatannya seperti sama, akan tetapi berbeda dengan kondisi laminat sebelumnya. Laminat ini berarti bahwa sudut di antara lamina yang berdekatan memiliki rumus $\pi/2$. Misalnya laminat dengan orientasi sudut $[90^\circ / 45^\circ / 0^\circ / -45^\circ]$ merupakan laminat quasi isotropik.



Gambar 2.9. Contoh Laminat Quasi Isotropik

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pengujian benda kerja dilakukan sebanyak dua cara. Yaitu pengujian untuk kelenturan dan pengujian tarik. Pengujian tarik menggunakan standart pengujian ASTM D 3500-90. Sedangkan pengujian kelenturan menggunakan pengujian bending ASTM D 3040-87 untuk pembebanan satu titik.

3.1. Perlengkapan Pengujian

3.1.1. Bahan Baku dan Spesifikasinya

Bahan baku yang dipergunakan untuk material plywood secara keseluruhan berasal dari kayu spesies Meranti Merah (Shorea Spec. Div.). Bahan veneer diambil setelah veneer keluar dari proses dryer dengan kadar air kurang lebih 12 %.

Sebelum diambil, terlebih dahulu diperiksa kadar airnya agar selalu berada dalam kondisi 12 %. Karena diperlukan spesimen uji dengan orientasi sudut yang berbeda-beda, maka diambil veneer-veneer sisa potongan. Ketebalan veneer yang diambil adalah rata-rata 1 mm.

Jenis lem yang akan dipakai adalah jenis yang umum dipakai dengan bahan dan prosentasi penyusunnya sesuai dengan produk glue mixer. Pengeleman hanya dilakukan pada core di bagian sisi muka dan belakang.

3.1.2. Peralatan Penunjang

Peralatan yang ada sangatlah terbatas. Merupakan fasilitas yang ada di PT NUSANTARA PLYWOOD, BALAI PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI dan PT NUSAPRIMA PRATAMA INDUSTRY. Alat-alat penunjang selama pembuatan spesimen maupun pengukuran sampai pengujian berakhir adalah sebagai berikut :

- Moisture Content
- Timbangan
- Ruang kadar air
- Jangka sorong
- Mikrometer
- Penggaris logam panjang
- Busur lingkaran
- Kertas gosok
- Alat pengukur defleksi (dial)
- Ember dan air
- Gergaji mesin
- Cutter
- Meteran
- Dry Oven
- Gunting

3.2. Mesin Uji yang Dipergunakan

Pengujian dilakukan di dua tempat yang berbeda, dimana peralatan masing-masing disediakan di tempat pengujian. Untuk pengujian tarik diperlukan peralatan pengukur Moisture Content, jangka sorong serta ember untuk merendam kayu sebagai penambahan kadar air. Sedangkan

untuk peralatan yang berupa mesin-mesin memiliki spesifikasi sebagai berikut :

a. Mesin uji tarik

- Merk : T O R S E E type RAT 20
- Buatan : Tokyo Testing Machine MFG. Co. Ltd. Japan
- Kapasitas : 20 ton

b. Mesin uji bending

- Merk : Z W I C K type 2201 W - Nr.60155
- Buatan : Jerman
- Kapasitas : 500 kg

3.3. Proses Pembuatan Spesimen Uji

Proses pembuatan spesimen uji pada prinsipnya harus disesuaikan dengan proses produksi plywood untuk tiga plies.

3.3.1. Kebutuhan spesimen uji

a. Spesimen yang akan diuji tarik dan bending sebanyak tiga plies. Kebutuhan akan spesimen didasarkan atas jumlah pengujian yang akan dilakukan. Sedangkan untuk masing-masing orientasi sudut tertentu dimasukkan parameter kadar air sebanyak 7 perubahan, yaitu mulai dari 12 %, 16 %, 20 %, 24 %, 28 %, 32 % dan 36 %. Untuk variasi perubahan sudutnya sebanyak delapan buah, yaitu :

* $90^{\circ} / 0^{\circ} / 90^{\circ}$

* $-30^{\circ} / 0^{\circ} / 30^{\circ}$

* $-45^{\circ} / 0^{\circ} / 45^{\circ}$

* $-60^{\circ} / 0^{\circ} / 60^{\circ}$

* $0^{\circ} / 90^{\circ} / 0^{\circ}$

* -30° / 90° / 30°

* -45° / 90° / 45°

* -60° / 90° / 60°

Kebutuhan spesimen :

a.1. Pengujian tarik :

Terdiri dari 8 variasi orientasi sudut, 7 parameter kadar air dan masing-masing dilakukan 2 kali pengujian. Total pengujian dilakukan adalah:

$$\begin{aligned}\text{Total} &= 2 \times 7 \times 8 \\ &= 112 \text{ pengujian}\end{aligned}$$

Jadi dibutuhkan 112 spesimen uji.

a.2. Pengujian bending :

Totalnya dilakukan sebanyak 2 kali pengujian untuk masing-masing perubahan orientasi sudut dan parameter kadar air. Total spesimen diperlukan :

$$\begin{aligned}\text{Total} &= 2 \times 7 \times 8 \\ &= 112 \text{ pengujian}\end{aligned}$$

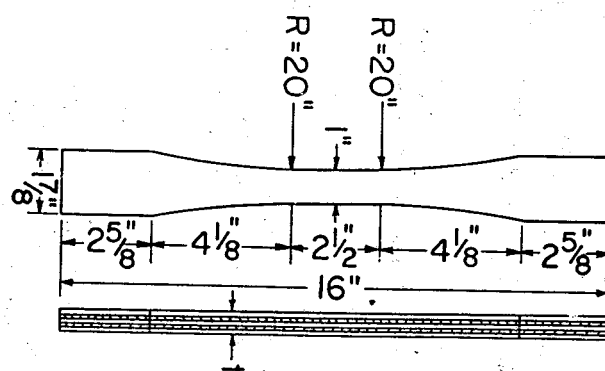
Jadi dibutuhkan sebanyak 112 spesimen uji.

Perubahan orientasi sudut terbanyak dalam pembuatan spesimen uji adalah pada face dan backnya. Sebabnya karena kedua permukaan inilah yang diasumsikan memiliki kekuatan lebih baik dibandingkan lapisan core untuk ketebalan yang sama. Ini dikarenakan bahan core adalah produk veneer yang merupakan kayu yang berposisi agak ke tengah, sehingga dihasilkan produk veneer yang banyak cacatnya karena kondisi kayu bagian tengah memang lemah (letak kayu yang mendekati hati).

3.3.2. Persiapan Bahan

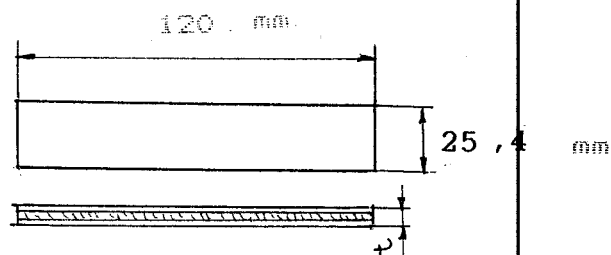
3.3.2.1. Dimensi Spesimen

Dalam pengujian tarik yang mengacu pada standarisasi ASTM D 3500-90 dimensinya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1. Dimensi spesimen uji tarik

Sedangkan untuk pengujian bendingnya, dimensi spesimen ujinya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.2. Spesimen uji bending

3.3.2.2. Pemotongan Veneer

Persiapan bahan diawali dengan pengukuran sekaligus pemotongan veneer dengan menggunakan gunting. Pemotongan dengan memperhatikan kekuatan veneer terhadap pengguntingan. Karena kondisi veneer yang tipis (dalam hal ini 1 mm), maka pemberian toleransi retakan terhadap veneer harus diberikan. Pemotongan veneer yang lebar menjadi kecil-kecil disesuaikan dengan orientasi sudut serat yang dibutuhkan. Pengukuran dan pemotongan veneer terdiri dari beberapa langkah, yaitu :

- a. Untuk spesimen uji diukur panjang dan lebarnya sesuai dengan standart ditambah toleransi untuk pemotongan dengan gergaji mesin setebal 3 mm (dalam hal ini toleransi dibuat sebesar 5 mm sebagai faktor keamanan untuk jarak antara satu spesimen terhadap spesimen yang lainnya, sebagai tempat untuk pemotongan gergaji mesin setebal 3 mm, serta berjarak 20 mm dari ujung tepi pemotongan untuk menghindari kekurangan veneer akibat kerusakan pada saat pengguntingan.

a.1. Pengujian tarik

Ukuran spesimen : 406 mm x 48 mm.

Ukuran veneer : 440 mm x 416 mm untuk 1 plywood.

Satu plywood menghasilkan 7 spesimen.

a.2. Pengujian bending

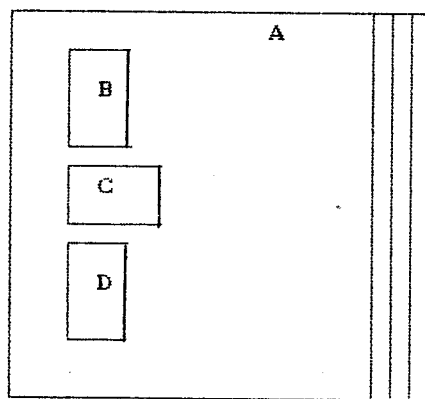
Ukuran spesimen : 150 mm x 25 mm.

Ukuran veneer disamakan dengan pengukuran untuk pengujian tarik. Dalam pengujian bending ini, karena spesimen kecil, maka dapat dibuat satu plywood untuk dua orientasi sudut yang identik,

yaitu : $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ dan $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$; $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$ dan $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$; $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$ dan $45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$; serta $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$ dan $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$.

- b. Selanjutnya pengukuran dan pemotongan dilakukan pada veneer produk. Pemotongan pada kondisi lurus pada pengujian bending dilakukan dengan gergaji mesin. Sedangkan untuk kondisi yang tidak lurus dan kondisi gergaji mesin tidak memungkinkan, maka dilakukan pemotongan dengan cutter. Pemotongan dengan cutter supaya dapat lurus, maka digunakan penggaris logam untuk meluruskannya.

b.1. Orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$



Keterangan :

A : Veneer produk

B : Ply I

C : Ply II

D : Ply III

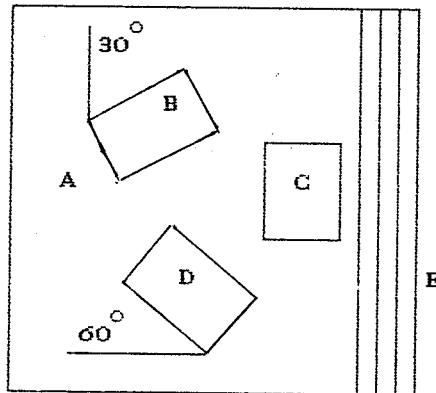
E : Arah Serat

Vertikal

(Arah panjang dan lebar sesuai dengan gambar)

Gambar 3.3. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$

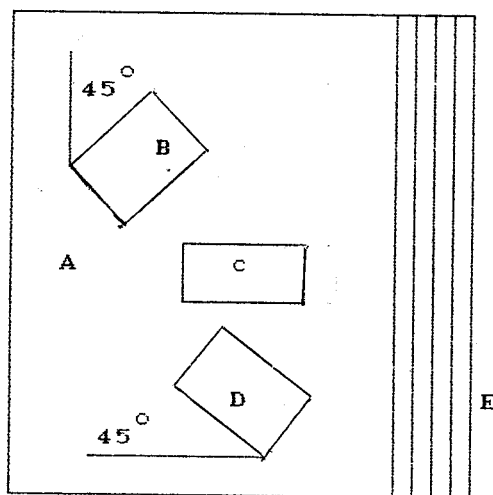
Untuk orientasi sudut $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$, posisi ply I dan ply II adalah horizontal terhadap arah serat ke atas. Sedangkan ply II posisinya vertikal.

b.2. Orientasi sudut $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$ 

Keterangan : IDEM

Gambar 3.4. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-30/0/30$

Untuk orientasi sudut $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$, ply I dan ply III posisinya sama, hanya saja pada ply II arahnya horizontal terhadap arah serat (untuk pembentukan orientasi sudut 90°).

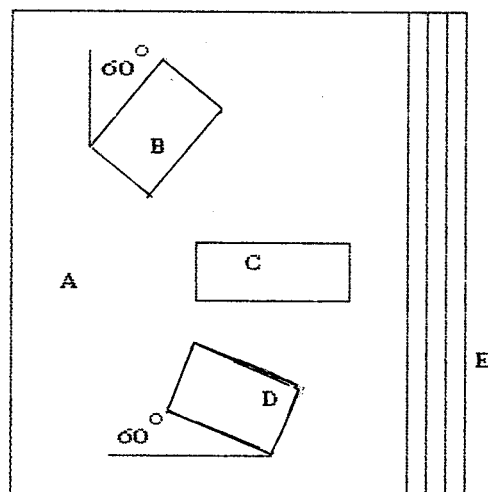
b.3. Orientasi sudut $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ 

Keterangan : IDEM

Gambar 3.5. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-45/0/45$

Untuk orientasi sudut $-45^{\circ} / 90^{\circ} / 45^{\circ}$ ply I dan III sama, sedangkan ply II arahnya vertikal terhadap arah serat.

b.4. Orientasi sudut $-60^{\circ} / 0^{\circ} / 60^{\circ}$



Keterangan : IDEM

Gambar 3.6. Arah pemotongan veneer untuk orientasi sudut $-60/0/60$

Untuk orientasi sudut $-60^{\circ} / 90^{\circ} / 60^{\circ}$, pada ply I dan III arahnya sama dengan keadaan di atas. Pada ply II posisinya vertikal terhadap arah serat.

3.3.3. Pengerjaan spesimen

- Berikutnya dilakukan pengeleman dengan cara melewati core ke dalam glue spreader. Sistem kerja glue spreader kecil cukup sederhana, yaitu dua roll yang diatur jaraknya sesuai dengan ketebalan core dan berputar sambil mencelup ke dalam glue. Mesin putar roll adalah motor, sedangkan untuk memasukkan core dilakukan secara manual.
- Setelah itu kondisi masing-masing ply diatur sesuai

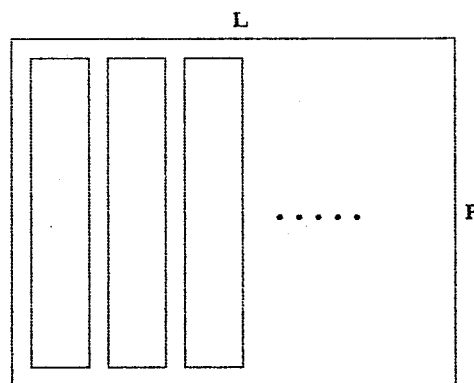
dengan susunan yang telah ditentukan untuk diratakan lemnya pada mesin cold press.

- c. Pengepresan dilanjutkan ke mesin berikutnya, yaitu hot press. Dilakukan untuk meratakan lem lebih lanjut sekaligus mempercepat pengeringan. Perlu diperhatikan disini besarnya tekanan harus disesuaikan dengan kondisi plywood yang ada.

3.3.4. Pemotongan

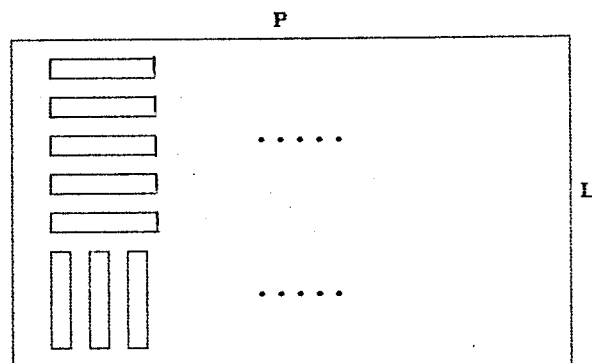
Pemotongan spesimen dilaksanakan dengan menggunakan gergaji mesin. Sesuai dengan pengukuran terhadap veneer di langkah sebelumnya, maka untuk lebih jelasnya pemotongan produk plywood dapat dilihat pada gambar berikutnya.

- a. Pengujian tarik



Gambar 3.7. Arah pemotongan plywood pengujian tarik

b. Pengujian bending



Gambar 3.8. Arah pemotongan spesimen pengujian bending

3.3.5. Pengampelasan

Pengampelasan dilakukan untuk memperhalus permukaan spesimen uji. Kekasaran permukaan akan menjadikan suatu notch yang jika dibiarkan akan menjadi suatu awal retakan. Hal ini akan menjadikan pengujian tidak valid, karena kerusakan terjadi sebelum material berada pada kondisi mendapat tegangan ultimate. Pengampelasan seperti ini jika dianalogkan dengan pengujian logam adalah untuk membersihkan permukaan logam untuk menghilangkan karat dan mempermudah untuk mengukur dimensi penampang logam.

3.4. Pengujian

3.4.1. Kadar Air dan Dimensi Spesimen

Dimensi spesimen uji menyesuaikan dengan masing-masing standart yang digunakan. Sedangkan kadar airnya digunakan mulai dari 12 %, 16 %, 20 %, 24 %, 28 %, 32 % sampai dengan 36 % mempunyai kenaikan masing-masing

sebesar 4 %. Untuk pemakaian kadar air di bawah 12 % dan di atas 32 % akan menunjukkan sifat mekanik yang sama dengan kondisi sebelumnya (12 % dan 32 %) tadi. Pengambilan perbedaan kadar air dengan kenaikan 4 % setiap kenaikannya adalah menyesuaikan dengan referensi yang ada untuk mempermudah pengujian dan mendapatkan data-data yang ada itu sendiri.

a. Pengujian tarik

Pengujian menggunakan standart ASTM D 3500-1990. Pada standart ini terdapat tiga macam spesimen uji. Untuk struktur panel, plywood maupun komposit kayu dengan orientasi sudut serat 0° dan 90° , tipe A sebaiknya digunakan untuk material dengan ketebalan lebih dari 1/4 in (6 mm). Untuk ketebalan 1/4 in (6 mm) atau kurang sebaiknya digunakan tipe B. Tetapi jika plywood memiliki orientasi sudut bervariasi terhadap sumbu utamanya, maka sebaiknya digunakan tipe C dengan mengabaikan ketebalan.

b. Pengujian bending

Dibuat berdasarkan standart ASTM D 3040-1987 yang terdiri dari tiga metode, yaitu :

- Metode A : Untuk test kelenturan dengan beban pada titik pusat
- Metode B : Untuk test kelenturan dengan pembebanan pada dua titik
- Metode C : Test kelenturan momen murni.

Pemilihan metode didasarkan atas tujuan pengujian , tipe material dan peralatan yang tersedia. Metode A dan B digunakan untuk material dengan keseragaman

strength dan stiffness. Metode C digunakan untuk spesimen yang diduga memiliki strength dan stiffness yang berbeda.

Pada metode B untuk ketebalan material kurang dari 1/4 in (6 mm), lebar spesimen adalah 1 in (25,4 mm). Sedangkan ketebalan lebih dari 1/4 in (6 mm) digunakan spesimen dengan lebar 2 in (50,8 mm). Untuk orientasi sudut panel paralel terhadap sumbu utama spesimen, maka panjang spesimen uji tidak boleh kurang dari 48 kali tebalnya ditambah 2 in. Untuk orientasi sudut yang tegak lurus sumbu utama, maka panjang spesimen tidak boleh dari 24 kali tebal ditambah 2 in. Sedangkan untuk variasi sudut serat, dapat diletakkan diantara keduanya.

Pada pengujian kelenturan kali ini dipilih metode A, karena memang peralatan yang ada hanya memenuhi kriteria pengujian A. Disamping itu untuk menemukan kelenturan material yang termudah antara ketiga pilihan tadi adalah dengan metode A.

3.4.2. Pelaksanaan Pengujian

a. Pengujian tarik dan bending

Pada dasarnya pelaksanaan kedua pengujian ini adalah sama, hanya saja berbeda pada kondisi kerjanya.

Langkah kerja :

1. Pengukuran awal benda uji, mulai dari ketebalan, panjang, lebar maupun gauge lengtnya.
2. Benda uji direndam dalam air.
3. Benda uji diukur kadar airnya berikut dicari sesuai

dengan kebutuhan dan disesuaikan dengan orientasi sudut serat yang diperlukan. Jika kadar air terlalu banyak, maka bisa dioven terlebih dahulu untuk mendapatkan kadar air yang sesuai.

4. Kertas grafik dipersiapkan (pada mesin uji tarik).
5. Benda uji dipasang pada mesin uji dan mesin segera dijalankan sampai material patah (untuk pengujian^o bending, alat pengukur defleksi dipasang pada posisi berlawanan dari arah pembebanan).
6. Dicatat berapa besar gaya diperlukan sekaligus regangan atau kelenturan yang terjadi.
7. Benda uji dilepas dari pencekam dan dilanjutkan dengan yang lain.

3.4.3. Perhitungan Kekuatan

a. Pengujian tarik

a.1. Perhitungan kekuatan tarik

$$S = \frac{P}{b \times d}$$

dimana :

S = Ultimate Tensile Strength

P = Beban maksimum

b = Tebal spesimen

d = Lebar spesimen

a.2. Perhitungan Modulus Elastisitas

$$E = \frac{P \cdot L}{\Delta L \cdot b \cdot d}$$

dimana :

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

L = Gauge Length (mm)

skj

b. Perhitungan uji bending

83

b.1. Kekuatan bending

$$KL = \frac{3 B s}{2 l t^2} \quad \text{dimana :}$$

KL = Kekuatan bending (kg/cm²)

B = Beban maksimum (kg)

s = Jarak sangga/span (cm)

l = Lebar spesimen (cm)

t = Tebal spesimen (cm)

b.2. Perhitungan kecepatan pembebanan

$$N = z \cdot L^2 / 6 \cdot d$$

dimana :

N = Kecepatan gerakan pembeban (mm/menit)

z = Konstanta satuan regangan serat, yang dalam hal ini besarnya 0,0015

L = Panjang span (mm)

d = Ketebalan (mm)

b.3. Perhitungan regangan akibat bending

Sesuai dengan standart ASTM D 790M-93 bahwa terjadi regangan akibat bending yang besarnya tidak boleh melebihi 0,05 mm/mm. Perhitungan regangan adalah sebagai berikut :

$$r = \frac{6 \cdot D \cdot d}{s^2}$$

dimana : D = defleksi (mm)

r = regangan bending (mm/mm)

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Untuk membandingkan antara pengujian dan hasil perhitungan, diperlukan data-data yang berasal dari hasil pengujian. Pembebanan yang dilakukan sampai dengan batas ultimate material plywood adalah merupakan input bagi perhitungan untuk mendapatkan regangannya secara perhitungan (untuk perhitungan tarik) dan mendapatkan kelengkungan untuk perhitungan bending.

Sedangkan untuk input-input yang lainnya berupa data fleksibel didapat pula dari pengukuran di lapangan (pengujian). Yaitu ketebalan produk, panjang span, orientasi sudut maupun kadar air dan temperaturnya.

4.1. Data

Data-data yang didapatkan adalah sebagai berikut :

- a. Density (12 %) : 0,46 kg/cm³
- b. Specific Gravity (12 %) : 0,460
- c. Modulus Elastisitas Longitudinal : 955,33 kg/mm²
- d. Modulus Elastisitas Transversal : 503,46 kg/mm²
- e. Poisson Ratio (ν_{12}) : 0,470
- f. Poisson Ratio (ν_{21}) : 0,248

4.2. Hasil Pengujian

Untuk mengetahui sifat-sifat mekanik material komposit laminat, maka diambil beberapa sampel yang

dianggap mewakili material tersebut. Dalam hal ini untuk masing-masing orientasi sudut dan kadar airnya dilakukan dua kali pengujian yang kesemuanya nanti diambil rata-ratanya sebagai dasar perhitungan serta untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan.

Hasil pengujian kesemuanya dikumpulkan dalam tabel-tabel untuk kemudian dibuat suatu grafik sebagai perbandingan agar tampak jelas hasil dari pengujian dan hasil dari pengujian. Pembebanan dilakukan menurut variasi kadar air yang telah ditentukan, yaitu 12%, 16%, 20%, 24%, 28%, 32% dan 36%.

Jika dari pengujian tarik akan didapatkan hasil berupa besar regangan yang terjadi sekaligus dapat pula dihitung modulus elastisitas arah pembebanan saja, sedangkan untuk pengujian bending akan didapatkan hasil berupa besar defleksi yang terjadi sebagai akibat pembebanan serta dapat dilanjutkan dengan perhitungan kelenturan yang terjadi. Untuk perbandingannya dengan teoritis sama, hanya dilakukan pada rata-rata hasil perhitungannya saja.

4.2.1. Pengujian tarik

a. Orientasi sudut serat laminat $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ dan $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$

No.	Sudut ($^{\circ}$)	%Air	LO(mm)	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	Ll (mm)	S(kg/mm ²)
1	90/0/90	12	49,55	28,30	3,037	310	49,95	3,6116
2	90/0/90	12	49,85	28,35	3,025	319	50,15	3,7140
	90/0/90	12	49,70	28,33	3,031	315	50,05	3,6628
3	90/0/90	16	49,60	28,49	3,039	369	50,00	4,2576
4	90/0/90	16	50,05	26,98	3,032	362	50,55	4,4253
	90/0/90	16	49,85	27,74	3,036	366	50,275	4,3415
5	90/0/90	20	50,45	27,66	3,024	425	50,55	5,0858
6	90/0/90	20	49,90	27,65	3,047	399	50,35	4,7361
	90/0/90	20	50,18	27,66	3,036	414	50,45	4,9245
7	90/0/90	24	50,00	27,61	3,056	434	50,50	5,1436
8	90/0/90	24	49,55	27,48	3,028	446	50,00	5,3600
	90/0/90	24	49,55	27,55	3,042	440	50,25	5,2502
9	90/0/90	28	50,00	26,84	3,053	444	50,60	5,4232
10	90/0/90	28	49,55	27,44	3,047	436	50,05	5,2158
	90/0/90	28	50,55	27,14	3,050	440	50,325	5,3193
11	90/0/90	32	50,70	27,45	3,038	443	51,85	5,3122
12	90/0/90	32	49,50	28,32	3,036	477	50,75	5,5478
	90/0/90	32	50,10	27,89	3,037	460	51,30	5,4300
13	90/0/90	36	50,25	26,28	3,052	373	51,15	4,6490
14	90/0/90	36	49,80	27,76	3,035	263	50,70	3,1186
	90/0/90	36	50,03	27,02	3,044	319	50,925	3,8838
15	-60/0/60	12	49,10	25,75	2,900	209	49,35	2,7996
16	-60/0/60	12	49,65	28,19	2,998	245	49,95	2,8944
	-60/0/60	12	49,38	26,97	2,949	226	49,65	2,8470
17	-60/0/60	16	50,00	26,93	2,966	310	50,30	3,8816
18	-60/0/60	16	49,70	27,76	2,912	256	50,05	3,1722
	-60/0/60	16	49,85	27,35	2,939	283	50,175	3,5268
19	-60/0/60	20	49,50	27,10	3,084	295	49,80	3,5271
20	-60/0/60	20	49,80	28,53	2,889	377	50,20	4,5796
	-60/0/60	20	49,65	27,82	2,987	337	50,00	4,0533
21	-60/0/60	24	49,70	26,05	3,082	332	50,00	4,1326
22	-60/0/60	24	49,70	25,63	2,843	333	50,10	4,5741
	-60/0/60	24	49,70	25,84	2,963	333	50,05	4,3533
23	-60/0/60	28	49,65	27,09	3,009	367	50,70	4,5025
24	-60/0/60	28	49,75	27,78	2,735	329	51,00	4,3253
	-60/0/60	28	49,70	27,44	2,872	348	50,85	4,4139
25	-60/0/60	32	49,65	26,62	3,034	277	50,85	3,4271
26	-60/0/60	32	49,90	25,93	2,784	232	51,20	3,2196
	-60/0/60	32	49,78	26,28	2,909	254	51,025	3,3233
27	-60/0/60	36	49,60	27,38	2,941	261	50,10	3,2453
28	-60/0/60	36	49,95	26,21	3,058	260	50,30	3,2442
	-60/0/60	36	49,55	26,80	3,000	260	50,20	3,2447

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Tarik (Laminat 90/0/90 dan -60/0/60)

b Orientasi sudut serat laminat $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ dan $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	LO(mm)	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	Ll(mm)	S(kg/mm ²)
29	-45/0/45	12	49,70	27,76	2,943	125	49,80	1,5313
30	-45/0/45	12	49,60	27,14	2,938	106	49,75	1,3275
	-45/0/45	12	49,65	27,45	2,941	115	49,775	1,4294
31	-45/0/45	16	50,00	26,83	2,850	120	50,10	1,5693
32	-45/0/45	16	50,00	28,84	3,025	126	50,05	1,4443
	-45/0/45	16	50,00	27,84	2,938	123	49,075	1,5038
33	-45/0/45	20	49,60	27,78	2,957	128	49,70	1,5582
34	-45/0/45	20	50,00	26,89	3,027	128	50,15	1,5726
	-45/0/45	20	49,80	27,34	2,992	128	49,925	1,5648
35	-45/0/45	24	49,40	28,10	2,923	141	49,55	1,7167
36	-45/0/45	24	49,85	28,13	2,892	132	50,10	1,6226
	-45/0/45	24	49,63	28,12	2,908	137	49,825	1,6693
37	-45/0/45	28	49,40	27,59	2,966	211	49,60	2,5785
38	-45/0/45	28	49,90	26,74	2,989	215	50,15	2,6900
	-45/0/45	28	49,65	27,17	2,978	213	49,875	2,6325
39	-45/0/45	32	49,90	28,10	2,957	250	50,15	3,0087
40	-45/0/45	32	49,95	25,90	3,102	258	50,25	3,2113
	-45/0/45	32	49,80	27,00	3,030	254	50,20	3,1048
41	-45/0/45	36	50,05	26,97	2,964	142	50,25	1,7764
42	-45/0/45	36	50,10	27,65	3,048	130	50,20	1,5425
	-45/0/45	36	50,08	27,31	3,006	136	50,225	1,6566
43	-30/0/30	12	49,80	27,04	2,830	298	49,95	3,8492
44	-30/0/30	12	49,65	28,75	2,918	280	49,80	3,3376
	-30/0/30	12	49,73	27,90	2,874	289	49,875	3,6042
45	-30/0/30	16	50,00	26,62	2,868	302	50,20	3,9557
46	-30/0/30	16	50,05	26,67	2,766	310	50,30	4,2023
	-30/0/30	16	50,03	26,65	2,817	306	50,25	4,0760
47	-30/0/30	20	49,90	27,95	2,842	311	50,25	3,9152
48	-30/0/30	20	49,80	27,59	2,702	320	50,10	4,2925
	-30/0/30	20	49,85	27,77	2,772	317	50,175	4,1050
49	-30/0/30	24	49,70	26,80	2,742	354	50,15	4,8173
50	-30/0/30	24	49,85	27,68	2,918	328	50,30	4,0610
	-30/0/30	24	49,78	27,24	2,830	341	50,225	4,4234
51	-30/0/30	28	50,00	26,88	2,578	386	50,90	5,5706
52	-30/0/30	28	49,95	28,21	2,903	378	50,70	4,6157
	-30/0/30	28	49,98	27,55	2,741	382	50,80	5,0586
53	-30/0/30	32	49,80	27,91	2,844	390	50,80	4,9133
54	-30/0/30	32	49,80	27,51	2,872	383	51,05	4,8476
	-30/0/30	32	49,80	27,71	2,857	387	50,925	4,8884
55	-30/0/30	36	49,40	28,30	2,858	322	49,90	3,9811
56	-30/0/30	36	49,75	29,03	2,745	324	50,15	4,0659
	-30/0/30	36	49,58	28,67	2,802	323	50,025	4,0207

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Tarik (Laminat $-45/0/45$ dan $-30/0/30$)

c. Orientasi sudut serat laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$ dan $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	LO(mm)	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	Ll(mm)	S(kg/mm ²)
57	-60/90/60	12	49,75	27,40	2,840	94	49,95	1,2080
58	-60/90/60	12	49,70	27,43	3,000	114	49,80	1,3853
	-60/90/60	12	49,73	27,42	2,920	104	49,875	1,2989
59	-60/90/60	16	49,30	26,40	3,000	125	49,45	1,5783
60	-60/90/60	16	49,70	28,14	2,716	106	50,55	1,3869
	-60/90/60	16	49,50	27,27	2,858	115	50,00	1,4755
61	-60/90/60	20	49,95	27,46	2,963	115	50,20	1,4134
62	-60/90/60	20	50,05	28,73	2,904	108	50,30	1,2945
	-60/90/60	20	50,00	28,10	2,934	117	50,25	1,4191
63	-60/90/60	24	50,70	27,00	2,917	120	51,00	1,5236
64	-60/90/60	24	50,35	28,29	3,067	132	50,65	1,5213
	-60/90/60	24	50,78	27,65	2,992	126	50,825	1,5234
65	-60/90/60	28	50,60	26,84	2,975	130	51,15	1,6281
66	-60/90/60	28	49,80	27,12	3,021	132	50,55	1,6111
	-60/90/60	28	50,20	26,98	2,998	131	50,85	1,6196
67	-60/90/60	32	49,70	27,59	2,950	150	50,00	1,8430
68	-60/90/60	32	50,50	28,88	2,944	168	51,25	1,9759
	-60/90/60	32	50,10	28,24	2,947	159	50,625	1,9105
69	-60/90/60	36	49,65	26,85	3,000	125	51,60	1,5518
70	-60/90/60	36	49,80	27,68	2,977	137	50,05	1,6626
	-60/90/60	36	49,73	27,27	2,989	131	50,825	1,6072
71	-45/90/45	12	49,80	27,40	3,014	228	49,95	2,7599
72	-45/90/45	12	50,60	27,16	2,806	227	50,80	2,9780
	-45/90/45	12	50,20	27,28	2,910	228	49,875	2,8690
73	-45/90/45	16	49,20	26,55	3,012	367	49,50	4,7120
74	-45/90/45	16	50,30	27,53	3,200	350	50,65	3,9725
	-45/90/45	16	49,75	27,04	3,106	365	50,075	4,3422
75	-45/90/45	20	50,50	27,43	3,047	338	50,90	4,0448
76	-45/90/45	20	50,25	26,89	3,027	330	50,70	4,0551
	-45/90/45	20	50,38	27,16	3,037	334	50,80	4,0499
77	-45/90/45	24	50,00	26,25	2,996	421	50,60	5,3478
78	-45/90/45	24	50,05	26,83	3,116	438	50,65	5,2436
	-45/90/45	24	50,03	26,54	3,056	430	50,625	5,2957
79	-45/90/45	28	51,40	26,78	3,027	425	52,10	5,2428
80	-45/90/45	28	51,20	27,08	2,963	441	51,90	5,4961
	-45/90/45	28	51,30	26,93	2,995	433	52,00	5,4188
81	-45/90/45	32	50,00	26,68	3,060	477	51,45	5,8413
82	-45/90/45	32	50,50	26,16	2,808	239	51,90	3,2579
	-45/90/45	32	50,25	26,42	2,934	353	51,675	4,5496
83	-45/90/45	36	51,10	26,04	3,008	361	51,45	4,6114
84	-45/90/45	36	49,60	26,36	2,947	402	49,95	5,1784
	-45/90/45	36	50,35	26,20	2,978	382	50,70	4,3949

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Tarik (Laminat $-30/90/90$ dan $-45/90/45$)

d. Orientasi sudut serat laminat $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$ dan $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	LO(mm)	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	Ll (mm)	$S(kg/mm^2)$
85	-30/90/30	12	50,00	27,67	2,840	345	50,35	4,1160
86	-30/90/30	12	49,90	28,35	2,702	301	50,30	3,9251
	-30/90/30	12	49,95	28,01	2,771	312	50,325	4,0206
87	-30/90/30	16	49,75	26,63	2,782	346	50,15	4,6672
88	-30/90/30	16	49,70	26,64	2,764	351	50,00	4,7663
	-30/90/30	16	49,73	26,64	2,773	348	50,075	4,7167
89	-30/90/30	20	49,50	29,97	2,758	385	49,85	4,6579
90	-30/90/30	20	50,50	29,02	2,886	396	50,40	4,7254
	-30/90/30	20	50,00	29,50	2,812	389	50,125	4,6917
91	-30/90/30	24	50,35	26,75	2,794	387	51,00	5,1815
92	-30/90/30	24	49,50	29,29	2,871	444	50,05	5,2849
	-30/90/30	24	49,93	28,02	2,833	415	50,525	5,2332
93	-30/90/30	28	49,80	27,24	2,818	390	50,30	5,0806
94	-30/90/30	28	49,60	27,39	2,745	410	50,25	5,4532
	-30/90/30	28	49,70	27,32	2,782	400	50,275	5,2629
95	-30/90/30	32	49,90	26,74	2,824	420	51,70	5,5619
96	-30/90/30	32	50,55	28,27	2,790	424	52,10	5,3758
	-30/90/30	32	50,23	27,51	2,807	422	51,90	5,4649
97	-30/90/30	36	50,05	28,13	2,736	318	50,55	4,1422
98	-30/90/30	36	49,80	27,63	2,723	264	50,55	3,5113
	-30/90/30	36	49,93	27,88	2,730	291	50,55	3,8267
99	0/90/0	12	49,65	29,45	2,986	372	50,45	4,2303
100	0/90/0	12	49,90	27,82	3,102	352	50,55	4,0789
	0/90/0	12	49,78	28,64	3,044	362	50,50	4,1523
101	0/90/0	16	50,00	27,08	3,016	383	50,85	4,6894
102	0/90/0	16	50,35	26,25	3,007	376	51,20	4,7635
	0/90/0	16	50,18	26,67	3,012	380	51,025	4,7265
103	0/90/0	20	49,20	26,19	3,069	385	50,25	4,7900
104	0/90/0	20	49,45	27,06	2,904	376	50,90	4,7848
	0/90/0	20	49,33	26,63	2,987	381	50,575	4,7874
105	0/90/0	24	49,10	26,16	2,888	396	50,35	5,2416
106	0/90/0	24	50,05	26,43	3,011	400	51,55	5,0263
	0/90/0	24	49,58	26,30	2,950	398	50,95	5,1340
107	0/90/0	28	49,60	26,35	3,018	449	51,05	5,6461
108	0/90/0	28	49,80	26,89	2,977	427	51,05	5,3341
	0/90/0	28	49,70	26,62	2,998	438	51,05	5,4901
108	0/90/0	32	50,05	27,60	3,120	642	51,80	7,4554
110	0/90/0	32	49,75	26,63	3,025	598	51,35	7,4234
	0/90/0	32	49,90	27,12	3,073	620	51,575	7,4394
111	0/90/0	36	45,95	27,43	3,090	425	46,85	5,0142
112	0/90/0	36	49,90	29,46	3,218	391	50,15	4,1244
	0/90/0	36	47,93	28,45	3,154	408	48,50	4,5469

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Tarik (Laminat $-60/90/60$ dan $0/90/0$)

4.2.2. Hasil Pengujian Bending

Pada pengujian bending, sebelumnya dilakukan perhitungan terhadap kecepatan pembebanan. Besarnya kecepatan pembebanan itu tergantung dari seberapa tebal spesimen yang tengah diuji. Berdasarkan persamaan (3.1) terdahulu, maka besarnya kecepatan pembebanan dapat dihitung sebagai berikut:

Jika diasumsikan untuk perhitungan ini, rata-rata ketebalan plywood adalah 3mm, maka besarnya kecepatan pembebanan (N) adalah :

$$\begin{aligned} N &= \frac{z \cdot L^2}{6 \cdot d} \\ &= \frac{0,0015 \cdot 120}{6 \cdot 3} \\ &= 1,2 \text{ mm/menit} \end{aligned}$$

Karena besarnya kecepatan pembebanan kecil sekali, maka dalam pengujian harus diamati secara cermat, dan bisa memperkirakan secara tepat sampai dimana pembebanan itu perlu dilakukan.

Hasil yang diperoleh dari pengujian bending ini adalah seberapa besar tegangan yang diberikan sekaligus mencatat seberapa besar defleksi yang terjadi sebagai akibat pembebanan tersebut dan regangan yang terjadi. Kemudian dari defleksi yang terjadi dapat dihitung seberapa besar kelengkungan arah sumbu x yang terjadi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada hasil pengujian sebagai berikut :

4.2.2.1. Kekuatan terhadap Pembebanan dan Defleksi Bending

a. Orientasi sudut serat laminat $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ dan $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	δ (mm)	S(kg/mm ²)
1	90/0/90	12	26,98	3,010	0,8	26,50	0,5891
2	90/0/90	12	25,88	2,993	0,8	25,00	0,6211
	90/0/90	12	26,43	3,002	0,8	25,75	0,6051
3	90/0/90	16	26,58	2,975	0,8	27,55	0,6121
4	90/0/90	16	27,32	2,980	0,7	27,00	0,5193
	90/0/90	16	26,95	2,978	0,75	27,275	0,5657
5	90/0/90	20	26,64	2,975	0,6	28,65	0,4581
6	90/0/90	20	27,88	2,968	0,6	28,50	0,4387
	90/0/90	20	27,26	2,972	0,6	28,575	0,4489
7	90/0/90	24	27,96	2,975	0,5	28,60	0,3637
8	90/0/90	24	26,04	2,982	0,6	28,80	0,4664
	90/0/90	24	27,00	2,979	0,55	28,70	0,4151
9	90/0/90	28	26,48	2,985	0,3	29,00	0,2289
10	90/0/90	28	28,01	3,000	0,3	30,50	0,2142
	90/0/90	28	27,25	2,993	0,3	29,60	0,2216
11	90/0/90	32	26,74	2,995	0,2	31,70	0,1501
12	90/0/90	32	26,54	2,988	0,2	30,05	0,1519
	90/0/90	32	26,64	2,992	0,2	30,875	0,1510
13	90/0/90	36	28,23	3,024	0,15	31,20	0,1046
14	90/0/90	36	27,58	3,025	0,2	32,55	0,1427
	90/0/90	36	27,91	3,025	0,18	31,775	0,1237
15	-60/0/60	12	27,93	3,080	1,9	20,45	1,2908
16	-60/0/60	12	28,00	3,090	1,9	20,55	1,2792
	-60/0/60	12	27,97	3,085	1,9	20,50	1,2848
17	-60/0/60	16	27,39	3,088	1,9	19,50	1,3094
18	-60/0/60	16	28,32	3,090	1,8	22,25	1,1982
	-60/0/60	16	28,13	3,089	1,9	20,875	1,2538
19	-60/0/60	20	27,02	3,083	1,75	24,50	1,2265
20	-60/0/60	20	27,48	3,105	1,7	22,65	1,5500
	-60/0/60	20	27,25	3,094	1,73	23,575	1,3883
21	-60/0/60	24	26,95	3,205	1,4	27,65	1,0064
22	-60/0/60	24	26,83	3,110	1,5	25,40	1,0404
	-60/0/60	24	26,89	3,158	1,45	26,525	1,0234
23	-60/0/60	28	26,43	3,078	1,0	24,40	0,6502
24	-60/0/60	28	26,67	3,090	1,0	29,50	0,7069
	-60/0/60	28	26,55	3,084	1,0	26,95	0,6786
25	-60/0/60	32	27,40	3,093	0,8	29,45	0,5494
26	-60/0/60	32	25,97	3,130	0,8	29,50	0,5660
	-60/0/60	32	26,69	3,223	0,9	29,475	0,5577
27	-60/0/60	36	26,79	3,080	0,8	29,60	0,5666
28	-60/0/60	36	27,75	3,123	0,8	30,00	0,5321
	-60/0/60	36	27,27	3,203	0,8	29,80	0,5493

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Bending (Laminat 90/0/90 dan -60/0/60)

b. Orientasi sudut serat laminat $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ dan $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	δ (mm)	S(kg/mm ²)
29	-45/0/45	12	26,34	3,070	5,7	21,20	3,6979
30	-45/0/45	12	24,20	3,043	4,7	19,75	3,7444
	-45/0/45	12	27,75	3,130	5,0	20,475	3,7212
31	-45/0/45	16	25,93	3,035	4,7	21,35	3,5420
32	-45/0/45	16	25,35	3,140	4,6	19,40	3,3128
	-45/0/45	16	26,81	3,098	4,6	20,375	3,4274
33	-45/0/45	20	27,97	3,045	4,5	22,80	3,1233
34	-45/0/45	20	24,32	3,048	4,6	22,55	3,6647
	-45/0/45	20	25,84	3,013	4,6	22,675	3,3940
35	-45/0/45	24	25,49	3,135	4,5	24,10	3,2333
36	-45/0/45	24	25,59	3,053	4,6	23,70	3,5127
	-45/0/45	24	27,10	3,033	4,5	23,90	3,3730
37	-45/0/45	28	25,43	3,063	3,9	23,60	2,9424
38	-45/0/45	28	28,42	3,110	4,2	27,90	2,7503
	-45/0/45	28	27,56	3,125	4,0	23,25	2,8464
39	-45/0/45	32	25,76	3,018	3,8	29,75	2,9152
40	-45/0/45	32	24,60	3,163	3,9	29,20	2,8523
	-45/0/45	32	27,36	3,043	3,8	29,475	2,8838
41	-45/0/45	36	27,31	3,050	3,6	27,00	2,5516
42	-45/0/45	36	25,73	3,035	3,5	29,65	2,6582
	-45/0/45	36	27,32	3,072	3,5	30,05	2,6049
43	-30/0/30	12	27,87	2,735	2,8	13,75	2,2264
44	-30/0/30	12	26,49	2,810	3,0	13,55	2,5817
	-30/0/30	12	27,85	2,762	3,0	13,65	2,4041
45	-30/0/30	16	25,87	2,855	1,6	22,05	1,3658
46	-30/0/30	16	27,49	2,695	1,8	21,15	1,7129
	-30/0/30	16	26,42	2,850	1,9	21,60	1,5394
47	-30/0/30	20	27,38	2,700	1,5	22,30	1,3527
48	-30/0/30	20	26,19	2,750	1,3	22,30	1,1814
	-30/0/30	20	25,35	2,763	1,5	22,30	1,2671
49	-30/0/30	24	24,34	2,778	0,8	24,65	0,7666
50	-30/0/30	24	26,26	2,640	1,2	24,35	1,1802
	-30/0/30	24	27,21	2,864	1,2	24,50	0,9734
51	-30/0/30	28	26,39	2,850	0,8	26,10	0,6718
52	-30/0/30	28	26,10	2,775	0,7	26,00	0,6269
	-30/0/30	28	27,34	2,712	0,8	26,05	0,6494
53	-30/0/30	32	25,28	2,800	0,7	26,45	0,6357
54	-30/0/30	32	26,57	2,723	0,7	26,95	0,6396
	-30/0/30	32	24,97	2,736	0,7	26,25	0,6377
55	-30/0/30	36	27,03	2,810	0,5	27,45	0,4217
56	-30/0/30	36	26,77	2,770	0,5	27,00	0,4382
	-30/0/30	36	25,64	2,692	0,5	27,225	0,4300

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Bending (Laminat $-45/0/45$ dan $-30/0/30$)

c. Orientasi sudut serat laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$ dan $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	δ (mm)	S(kg/mm ²)
57	-60/90/60	12	28,29	2,750	0,5	22,00	0,4207
58	-60/90/60	12	25,17	2,840	0,7	20,40	0,6207
	-60/90/60	12	26,73	2,795	0,6	21,20	0,5227
59	-60/90/60	16	27,90	2,738	0,4	23,40	0,3442
60	-60/90/60	16	25,87	2,638	0,5	23,55	0,4319
	-60/90/60	16	26,89	2,688	0,45	22,15	0,3881
61	-60/90/60	20	25,95	2,863	0,5	22,10	0,4231
62	-60/90/60	20	27,79	2,605	0,45	24,10	0,4614
	-60/90/60	20	26,87	2,803	0,48	23,10	0,4423
63	-60/90/60	24	27,35	2,830	0,3	23,20	0,2465
64	-60/90/60	24	26,59	2,590	0,3	23,15	0,3028
	-60/90/60	24	26,97	2,720	0,3	23,175	0,2747
65	-60/90/60	28	26,53	2,795	0,3	24,10	0,2606
66	-60/90/60	28	27,16	2,588	0,3	24,10	0,2969
	-60/90/60	28	26,85	2,692	0,3	24,10	0,2788
67	-60/90/60	32	26,04	2,870	0,3	26,15	0,2518
68	-60/90/60	32	26,95	2,572	0,2	28,45	0,2019
	-60/90/60	32	26,50	2,721	0,25	27,30	0,2269
69	-60/90/60	36	26,76	2,585	0,2	28,00	0,2013
70	-60/90/60	36	27,27	2,640	0,1	27,50	0,0947
	-60/90/60	36	27,01	2,613	0,15	27,75	0,1480
71	-45/90/45	12	27,55	3,128	3,6	21,50	2,4039
72	-45/90/45	12	27,35	3,055	3,6	21,40	2,5038
	-45/90/45	12	27,45	3,079	3,6	21,45	2,4539
73	-45/90/45	16	26,46	3,125	4,0	23,00	2,7864
74	-45/90/45	16	26,98	3,035	3,2	23,35	2,3177
	-45/90/45	16	26,72	3,080	3,6	23,175	2,5521
74	-45/90/45	20	27,17	3,120	3,5	23,85	2,4558
75	-45/90/45	20	24,71	3,060	3,1	22,90	2,4117
	-45/90/45	20	25,94	3,090	3,3	23,375	2,4338
76	-45/90/45	24	25,54	3,098	3,4	24,25	2,3271
77	-45/90/45	24	25,95	3,120	3,4	23,15	1,7488
	-45/90/45	24	26,92	3,108	3,4	28,50	2,0380
78	-45/90/45	28	27,19	3,110	2,9	28,25	1,9737
79	-45/90/45	28	26,78	3,040	2,8	28,95	2,0364
	-45/90/45	28	27,02	3,134	2,85	28,60	2,0051
80	-45/90/45	32	26,99	3,083	2,8	28,65	2,5061
81	-45/90/45	32	28,35	3,270	2,8	28,80	1,6629
	-45/90/45	32	27,67	3,177	2,8	28,725	2,0845
82	-45/90/45	36	26,66	3,133	2,3	28,40	1,5821
83	-45/90/45	36	28,72	3,140	2,3	29,50	1,4620
	-45/90/45	36	27,66	3,137	2,3	28,95	1,5221

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Bending (Laminat $-30/90/30$ dan $-45/90/45$)

d. Orientasi sudut serat laminat $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$ dan $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$

No.	Sudut($^{\circ}$)	%Air	b(mm)	d(mm)	Pu(kg)	δ (mm)	S(kg/mm ²)
84	-30/90/30	12	25,77	3,272	2,6	22,00	1,6953
85	-30/90/30	12	26,09	3,205	2,6	19,55	1,7463
	-30/90/30	12	25,93	3,239	2,6	19,775	1,7208
86	-30/90/30	16	26,26	3,165	2,6	22,00	1,7791
87	-30/90/30	16	26,50	3,180	2,6	21,20	1,7464
	-30/90/30	16	26,38	3,210	2,6	21,60	1,7228
88	-30/90/30	20	27,93	3,235	2,5	24,00	1,5396
89	-30/90/30	20	27,06	3,243	2,2	23,40	1,5812
	-30/90/30	20	27,50	3,239	2,35	23,70	1,5604
90	-30/90/30	24	26,54	3,226	2,2	24,05	1,4337
91	-30/90/30	24	27,50	3,155	2,3	24,00	1,5091
	-30/90/30	24	27,02	3,191	2,25	24,025	1,4714
92	-30/90/30	28	26,60	3,148	1,8	23,95	1,2291
93	-30/90/30	28	27,48	3,253	2,0	25,05	1,2380
	-30/90/30	28	27,04	3,201	1,9	24,50	1,2336
94	-30/90/30	32	28,38	3,198	1,7	24,85	1,0543
95	-30/90/30	32	27,79	3,253	1,9	24,55	1,1630
	-30/90/30	32	28,09	3,226	1,8	24,70	1,1087
96	-30/90/30	36	27,72	3,268	1,5	25,60	0,9120
97	-30/90/30	36	28,06	3,335	1,7	26,85	0,9805
	-30/90/30	36	27,89	3,302	1,6	26,23	0,9463
98	0/90/0	12	28,02	2,965	6,2	13,80	4,5305
99	0/90/0	12	26,34	2,980	5,9	10,40	4,5402
	0/90/0	12	27,18	2,973	6,05	12,10	4,5354
100	0/90/0	16	27,73	2,995	5,6	15,30	4,0524
101	0/90/0	16	28,43	2,970	5,7	13,20	4,0913
	0/90/0	16	28,08	2,983	5,65	14,65	4,0719
102	0/90/0	20	25,88	2,976	5,4	16,00	4,2407
103	0/90/0	20	27,24	2,990	5,6	16,25	4,1391
	0/90/0	20	26,56	2,983	5,5	16,125	4,1899
104	0/90/0	24	25,98	2,966	5,3	16,50	4,1741
105	0/90/0	24	25,97	2,995	5,4	16,50	4,1725
	0/90/0	24	25,98	2,981	5,35	16,50	4,1733
107	0/90/0	28	27,94	2,954	5,1	16,95	3,7653
108	0/90/0	28	26,18	3,031	5,3	17,30	3,9665
	0/90/0	28	27,06	2,993	5,2	17,00	3,8659
109	0/90/0	32	25,53	2,984	4,7	16,20	3,7216
110	0/90/0	32	26,68	2,990	4,9	18,60	3,6978
	0/90/0	32	26,11	2,987	4,8	17,40	3,7097
112	0/90/0	36	26,40	2,936	4,2	18,00	3,3220
112	0/90/0	36	25,70	2,980	4,5	20,25	3,5491
	0/90/0	36	26,05	2,958	4,35	19,13	3,4356

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Bending (Laminat $-60/90/00$ dan $0/90/0$)

4.2.2.2. Rata-Rata Regangan Akibat Pembebanan Bending

No.	Orientasi sudut	% Air	Regangan X (mm/mm)
1	90/0/90	12	0,03321
2	90/0/90	16	0,03385
3	90/0/90	20	0,03539
4	90/0/90	24	0,03405
5	90/0/90	28	0,03436
6	90/0/90	32	0,04014
7	90/0/90	36	0,03850
8	-60/0/60	12	0,02765
9	-60/0/60	16	0,02687
10	-60/0/60	20	0,03040
11	-60/0/60	24	0,03491
12	-60/0/60	28	0,03463
13	-60/0/60	32	0,03847
14	-60/0/60	36	0,03784
15	-45/0/45	12	0,02765
16	-45/0/45	16	0,02879
17	-45/0/45	20	0,02756
18	-45/0/45	24	0,03530
19	-45/0/45	28	0,03125
20	-45/0/45	32	0,03423
21	-45/0/45	36	0,03846
22	-30/0/30	12	0,02463
23	-30/0/30	16	0,02541
24	-30/0/30	20	0,02567
25	-30/0/30	24	0,02934
26	-30/0/30	28	0,02944
27	-30/0/30	32	0,03084
28	-30/0/30	36	0,03029
29	-60/90/60	12	0,02469
30	-60/90/60	16	0,02481
31	-60/90/60	20	0,02698
32	-60/90/60	24	0,02627
33	-60/90/60	28	0,02703
34	-60/90/60	32	0,03095
35	-60/90/60	36	0,03021
36	-45/90/45	12	0,02752
37	-45/90/45	16	0,02975
38	-45/90/45	20	0,02682
39	-45/90/45	24	0,03691
40	-45/90/45	28	0,03184
41	-45/90/45	32	0,03607
42	-45/90/45	36	0,03784

Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Regangan Rata-Rata Bending I

No.	Orientasi sudut	% Air	Regangan X (mm/mm)
43	-30/90/30	12	0,03221
44	-30/90/30	16	0,03385
45	-30/90/30	20	0,03539
46	-30/90/30	24	0,03405
47	-30/90/30	28	0,03436
48	-30/90/30	32	0,04014
49	-30/90/30	36	0,03850
50	0/90/0	12	0,02765
51	0/90/0	16	0,02687
52	0/90/0	20	0,03040
53	0/90/0	24	0,03491
54	0/90/0	28	0,03463
55	0/90/0	32	0,03847
56	0/90/0	36	0,03784

Tabel 4.10. Hasil Perhitungan Regangan Rata-Rata Bending II

4.2.3. Temperatur Rata-Rata Pengujian

No.	Kadar Air (%)	Temperatur ($^{\circ}$ F)
1.	12	92,12
2.	16	89,86
3.	20	87,61
4.	24	86,00
5.	28	83,12
6.	32	80,88
7.	36	78,62

Tabel 4.11. Temperatur Spesimen Uji

4.3. Hasil Perhitungan Makromekanik

4.3.1. Perhitungan Matriks Stiffness, Matriks Reduced Stiffness, Matriks A, Matriks B, Matriks D dan Invers Masing-Masing Matriks

Untuk mendapatkan hasil perhitungan secara teoritis terlebih dahulu ditentukan sifat dari material komposit tersebut. Pada material plywood tiga plies ini, berdasarkan persamaan (2.4) didapatkan bahwa matriks compliance dengan satuan mm^2/kg adalah sebagai berikut :

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 10,468 & -4,917 & 0 \\ -4,917 & 19,863 & 0 \\ 0 & 0 & 30,769 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

Dan dari persamaan (2.6) didapatkan pula reduced stiffness matriks dengan satuan mm^2/kg sebagai berikut :

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} 10,810 & 2,676 & 0 \\ 2,676 & 5,697 & 0 \\ 0 & 0 & 3,250 \end{bmatrix} 10^2$$

Kemudian dari persamaan (2.12) didapatkan bahwa matriks kekakuan material komposit untuk masing-masing orientasi sudut adalah sebagai berikut :

$$\bar{Q}_{ij} \text{ sudut } 0^\circ = \begin{bmatrix} 10,810 & 2,676 & 0 \\ 2,676 & 5,697 & 0 \\ 0 & 0 & 3,250 \end{bmatrix} 10^2$$

$$\bar{Q}_{ij} \text{ sudut } 30^\circ = \begin{bmatrix} 9,878 & 2,330 & 0,907 \\ 2,330 & 7,321 & 1,307 \\ 0,907 & 1,307 & 2,904 \end{bmatrix} 10^2$$

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } 45^\circ &= \begin{bmatrix} 8,715 & 2,215 & 1,278 \\ 2,215 & 8,715 & 1,278 \\ 1,278 & 1,278 & 2,789 \end{bmatrix} 10^2 \\
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } 60^\circ &= \begin{bmatrix} 7,321 & 2,330 & 1,307 \\ 2,330 & 9,878 & 0,907 \\ 1,307 & 0,907 & 2,904 \end{bmatrix} 10^2 \\
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } 90^\circ &= \begin{bmatrix} 5,697 & 2,676 & 0 \\ 2,676 & 10,810 & 0 \\ 0 & 0 & 2,904 \end{bmatrix} 10^2 \\
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } -30^\circ &= \begin{bmatrix} 9,878 & 2,330 & -0,907 \\ 2,330 & 7,321 & -1,307 \\ -0,907 & -1,307 & 2,904 \end{bmatrix} 10^2 \\
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } -45^\circ &= \begin{bmatrix} 8,715 & 2,215 & -1,278 \\ 2,215 & 8,715 & -1,278 \\ -1,278 & -1,278 & 2,789 \end{bmatrix} 10^2 \\
 \bar{Q}_{ij} \text{ sudut } -60^\circ &= \begin{bmatrix} 7,321 & 2,330 & -1,307 \\ 2,330 & 9,878 & -0,907 \\ -1,307 & -0,907 & 2,904 \end{bmatrix} 10^2
 \end{aligned}$$

Dari beberapa macam variasi orientasi sudut sebanyak delapan buah didapatkan matriks A dari persamaan (2.17), matriks B dari persamaan (2.18) dan matriks D dari persamaan (2.19) sebagai dasar perhitungan regangan. Matriks A bersatuan $\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$, matriks B bersatuan $\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ matriks D bersatuan $\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}^3$.

a. Untuk orientasi sudut $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 27,318 & 8,028 & 0 \\ 8,028 & 22,205 & 0 \\ 0 & 0 & 9,750 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}A_{ij} = \begin{bmatrix} 4,096 & -1,481 & 0 \\ -1,481 & 5,039 & 0 \\ 0 & 0 & 10,256 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$^{-1}B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 23,897 & 6,021 & 0 \\ 6,021 & 13,245 & 0 \\ 0 & 0 & 7,313 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}D_{ij} = \begin{bmatrix} 4,726 & -2,485 & 0 \\ -2,485 & 8,527 & 0 \\ 0 & 0 & 13,675 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

Besarnya matriks B_{ij} adalah sama untuk setiap empat orientasi sudut serat dengan orientasi sudut serat core 0° dan berikut core dengan orientasi sudut serat 90° . Untuk core yang berorientasi sudut serat 0° didapatkan matriks B_{ij} adalah nol. Ini berarti tidak terjadi suatu

kopel terhadap material. Sedangkan untuk core dengan orientasi sudut 90° akan memiliki matriks B_{ij} , yang berarti terjadi suatu kopel di dalamnya (kecuali orientasi sudut $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$). Karena perhitungan invers B_{ij} tidak diperlukan dalam perhitungan analisis, maka perhitungan invers tidak dilakukan.

b. Untuk orientasi sudut $-30^\circ / 90^\circ / 30^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 25,453 & 7,337 & 0 \\ 7,337 & 25,453 & 0 \\ 0 & 0 & 9,058 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}A_{ij} = \begin{bmatrix} 4,285 & -1,235 & 0 \\ -1,235 & 4,285 & 0 \\ 0 & 0 & 11,040 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1,815 \\ 0 & 0 & 2,614 \\ 1,815 & 2,614 & 0 \end{bmatrix} 10^2$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 21,877 & 5,272 & 0 \\ 5,272 & 16,764 & 0 \\ 0 & 0 & 6,563 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}D_{ij} = \begin{bmatrix} 4,946 & -1,555 & 0 \\ -1,555 & 6,454 & 0 \\ 0 & 0 & 15,237 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

c. Untuk orientasi sudut $-45^\circ / 90^\circ / 45^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 23,127 & 7,106 & 0 \\ 7,106 & 28,240 & 0 \\ 0 & 0 & 8,828 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}A_{ij} = \begin{bmatrix} 4,686 & -1,179 & 0 \\ -1,179 & 3,838 & 0 \\ 0 & 0 & 11,328 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2,557 \\ 0 & 0 & 2,557 \\ 2,557 & 2,557 & 0 \end{bmatrix} 10^2$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 19,357 & 5,022 & 0 \\ 5,022 & 19,783 & 0 \\ 0 & 0 & 6,323 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}D_{ij} = \begin{bmatrix} 5,530 & -1,404 & 0 \\ -1,404 & 5,411 & 0 \\ 0 & 0 & 15,840 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

d. Untuk orientasi sudut $-60^\circ / 90^\circ / 60^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 20,340 & 7,337 & 0 \\ 7,337 & 3,057 & 0 \\ 0 & 0 & 9,058 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1}A_{ij} = \begin{bmatrix} 5,383 & -1,292 & 0 \\ -1,292 & 3,582 & 0 \\ 0 & 0 & 11,040 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2,614 \\ 0 & 0 & 1,815 \\ 2,614 & 1,815 & 0 \end{bmatrix} 10^2$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 16,338 & 5,272 & 0 \\ 5,272 & 2,230 & 0 \\ 0 & 0 & 6,563 \end{bmatrix} 10^2$$

$${}^{-1}D_{ij} = \begin{bmatrix} 6,626 & -1,566 & 0 \\ -1,566 & 4,854 & 0 \\ 0 & 0 & 15,237 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

e. Untuk orientasi sudut $-30^\circ / 0^\circ / 30^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 30,566 & 7,337 & 0 \\ 7,337 & 2,034 & 0 \\ 0 & 0 & 9,058 \end{bmatrix} 10^2$$

$${}^{-1}A_{ij} = \begin{bmatrix} 3,582 & -1,292 & 0 \\ -1,292 & 5,383 & 0 \\ 0 & 0 & 11,040 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 22,303 & 5,272 & 0 \\ 5,272 & 1,634 & 0 \\ 0 & 0 & 6,563 \end{bmatrix} 10^2$$

$${}^{-1}D_{ij} = \begin{bmatrix} 4,854 & -1,566 & 0 \\ -1,566 & 6,626 & 0 \\ 0 & 0 & 15,237 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

f. Untuk orientasi sudut $-45^\circ / 0^\circ / 45^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 28,240 & 7,106 & 0 \\ 7,106 & 23,127 & 0 \\ 0 & 0 & 8,828 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1} A_{ij} = \begin{bmatrix} 3,838 & -1,179 & 0 \\ -1,179 & 4,686 & 0 \\ 0 & 0 & 11,328 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 19,783 & 5,022 & 0 \\ 5,022 & 19,357 & 0 \\ 0 & 0 & 6,313 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1} D_{ij} = \begin{bmatrix} 5,411 & -1,404 & 0 \\ -1,404 & 5,530 & 0 \\ 0 & 0 & 15,840 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

g. Untuk orientasi sudut $-60^\circ / 0^\circ / 60^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 25,453 & 7,337 & 0 \\ 7,337 & 2,545 & 0 \\ 0 & 0 & 9,058 \end{bmatrix} 10^2$$

$$^{-1} A_{ij} = \begin{bmatrix} 4,285 & -1,235 & 0 \\ -1,235 & 4,285 & 0 \\ 0 & 0 & 11,040 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 16,764 & 5,272 & 0 \\ 5,272 & 21,877 & 0 \\ 0 & 0 & 6,563 \end{bmatrix} 10^2$$

$$D_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} 6,454 & -1,555 & 0 \\ -1,555 & 4,946 & 0 \\ 0 & 0 & 15,237 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

h. Untuk orientasi sudut $90^\circ / 0^\circ / 90^\circ$:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 22,205 & 8,028 & 0 \\ 8,028 & 27,318 & 0 \\ 0 & 0 & 9,750 \end{bmatrix} 10^2$$

$$A_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} 5,039 & -1,481 & 0 \\ -1,481 & 4,096 & 0 \\ 0 & 0 & 10,256 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 13,245 & 6,021 & 0 \\ 6,021 & 23,897 & 0 \\ 0 & 0 & 7,313 \end{bmatrix} 10^2$$

$$D_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} 8,527 & -2,149 & 0 \\ -2,419 & 4,726 & 0 \\ 0 & 0 & 13,675 \end{bmatrix} 10^{-4}$$

4.3.2. Analisis Pengaruh Higrothermal terhadap Lamina

Besarnya kadar air mempengaruhi kekuatan tarik dan kelenturan material plywood. Demikian pula dengan suhu material. Besarnya bervariasi tergantung dari besar masing-masing parameter tersebut. Dari gambar (Lampiran- didapatkan bahwa terjadi perubahan density terhadap perubahan kadar air yang nantinya akan berpengaruh terhadap Specific Gravity. Dalam tabel di bawah

disebutkan besar perubahan Specific Gravity terhadap kadar airnya :

No.	Kadar Air (%)	Specific Gravity
1.	12	C,460
2.	16	C,454
3.	20	C,447
4.	24	C,440
5.	28	C,430
6.	32	C,420
7.	36	C,410

Tabel 4.12. Perubahan Specific Gravity dari Kadar Air
Sedangkan dari persamaan (2.23) didapatkan besarnya penyusutan sebagai akibat perubahan kadar air yang nantinya akan berpengaruh terhadap besarnya konstanta ekspansi higroskopis, seperti yang tercantum, sebagai α dan β bersatuan $1/^\circ\text{F}$.

No.	% Air	Shrin.1	Shrin.2	β_1	β_2
1.	12	0,090	3,6	$1,071 \cdot 10^{-5}$	$1,286 \cdot 10^{-3}$
2.	16	0,023	2,8	$8,214 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}
3.	20	0,017	2,0	$6,071 \cdot 10^{-6}$	$7,143 \cdot 10^{-4}$
4.	24	0,010	1,2	$3,571 \cdot 10^{-6}$	$4,286 \cdot 10^{-4}$
5.	28	$3 \cdot 10^{-3}$	0,1	$1,071 \cdot 10^{-6}$	$1,429 \cdot 10^{-4}$
6.	32	$1,67 \cdot 10^{-3}$	0,2	$5,752 \cdot 10^{-7}$	$7,143 \cdot 10^{-5}$
7.	36	$1,67 \cdot 10^{-3}$	0,2	$5,752 \cdot 10^{-7}$	$7,143 \cdot 10^{-5}$

Shrin. 1 : Shrinkage searah sumbu 1 lamina

Shrin. 2 : Shrinkage searah sumbu 2 lamina

Tabel 4.13. Konstanta Ekspansi Higroskopis

Konstanta α_2 didapatkan dari perhitungan berdasarkan persamaan (2.24). Sedangkan besar α_1 besarnya didapatkan dari referensi Wood Handbook yang besarnya diantara $1,7 \cdot 10^{-6}$ sampai $2,5 \cdot 10^{-6}$ per derajat Farenheit. Dengan asumsi bahwa penurunan besar β_1 adalah linear terhadap perubahan kadar airnya, maka didapatkan konstanta ekspansi panas sebagai berikut :

Hal 86

No.	Kadar Air (%)	α_1	α_2
1.	12	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,358 \cdot 10^{-5}$
2.	16	$2,367 \cdot 10^{-6}$	$3,338 \cdot 10^{-5}$
3.	20	$2,233 \cdot 10^{-6}$	$3,315 \cdot 10^{-5}$
4.	24	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$3,292 \cdot 10^{-5}$
5.	28	$1,967 \cdot 10^{-6}$	$3,259 \cdot 10^{-5}$
6.	32	$1,833 \cdot 10^{-6}$	$3,226 \cdot 10^{-5}$
7.	36	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$3,193 \cdot 10^{-5}$

Tabel 4.14. Koefisien Ekspansi Panas

Perubahan temperatur selama pengujian dapat diukur melalui pengujian, dimana diasumsikan bahwa saat tidak terjadi regangan adalah pada waktu kayu memiliki kadar air 12 %.

Sehingga hasil pengukuran menghasilkan ΔT negatif karena akibat penurunan temperatur kayu sebagai akibat kenaikan kadar airnya. Besar temperatur berdasarkan pengujian di lapangan adalah sebagai berikut :

No.	Kadar Air (%)	T1 (° F)	TO (° F)	ΔT (° F)
1.	12	92,12	92,12	0
2.	16	89,86	92,12	-2,26
3.	20	87,61	92,12	-4,51
4.	24	86,00	92,12	-6,12
5.	28	83,12	92,12	-9,00
6.	32	80,88	92,12	-11,24
7.	36	78,62	92,12	-13,50

Tabel 4.15. Perubahan Temperatur Kayu

Konstanta ekspansi panas dan higroskopis ini masing-masing nantinya akan berubah berdasarkan perubahan orientasi sudut serat kayu yang akan dihitung.

4.3.3. Analisis Pengaruh Higrothermal terhadap Lamina dengan Perubahan Orientasi Sudut

Setelah dilakukan perhitungan terhadap lamina, perhitungan dilanjutkan dengan perhitungan terhadap lamina dengan perubahan orientasi sudut. Perubahan orientasi sudut serat sudah barang tentu akan berpengaruh terhadap besarnya konstanta ekspansi panas dan konstanta ekspansi higroskopis terhadap sumbu x dan sumbu y acuan. Besarnya koefisien ekspansi panas dan higroskopis menurut variasi orientasi sudut dan kadar airnya adalah sebagai berikut :

a. Untuk orientasi sudut 0° :

a.1. Kadar air 12 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,250 \\ 3,358 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,071 \\ 128,571 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

a.2. Kadar air 16 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,237 \\ 3,338 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,833 \\ 99,999 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

a.3. Kadar air 20 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,223 \\ 3,315 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,595 \\ 71,429 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

a.4. Kadar air 24 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,210 \\ 3,292 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,357 \\ 42,857 \\ 0 \end{bmatrix}$$

a.5. Kadar air 28 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,197 \\ 3,259 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,119 \\ 14,286 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

a.6. Kadar air 32 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,183 \\ 3,226 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,060 \\ 7,143 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

a.7. Kadar air 36 %

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,170 \\ 3,193 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5} \quad \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,060 \\ 7,143 \\ 0 \end{bmatrix} 10^{-5}$$

Sedangkan untuk besarnya α_x , α_y , α_{xy} , β_x , β_y dan β_{xy} pada orientasi sudut serat lamina lainnya dapat dilihat pada hasil perhitungan sebagai berikut :

Koefisien Thermal dan Higroskopis Masing-Masing Lamina

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	α_x 1E-5 mm/mm	α_y 1E-5 mm/mm	α_{xy} 1E-5 mm/mm	β_x 1E-5 mm/mm	β_y 1E-5 mm/mm	β_{xy} 1E-5 mm/mm
1	12	30	1,027	2,581	1,346	32,946	96,696	55,209
2	16		1,012	2,563	1,343	25,625	75,208	42,940
3	20		0,996	2,542	1,339	18,304	53,720	30,672
4	24		0,981	2,522	1,335	10,982	32,232	18,403
5	28		0,962	2,493	1,326	3,661	10,744	6,143
6	32		0,944	2,465	1,318	1,830	5,372	3,067
7	36		0,926	2,437	1,309	1,830	5,372	3,067
8	12	45	1,804	1,804	1,554	64,821	64,821	63,750
9	16		1,787	1,787	1,551	50,417	50,417	49,583
10	20		1,769	1,769	1,546	36,012	36,012	35,417
11	24		1,751	1,751	1,541	21,607	21,607	21,250
12	28		1,728	1,728	1,531	7,202	7,202	7,083
13	32		1,705	1,705	1,521	3,601	3,601	3,542
14	36		1,682	1,682	1,511	3,601	3,601	3,542
15	12	60	2,581	1,027	1,346	96,696	32,946	55,209
16	16		2,563	1,012	1,343	75,208	25,625	42,940
17	20		2,542	0,996	1,339	53,720	18,304	30,672
18	24		2,522	0,981	1,335	32,232	10,982	18,403
19	28		2,493	0,962	1,326	10,744	3,661	6,143
20	32		2,465	0,944	1,318	5,372	1,830	3,067
21	36		2,437	0,926	1,309	5,372	1,830	3,067
22	12	90	3,580	0,250	0	128,626	1,071	0
23	16		3,338	0,237	0	99,999	0,833	0
24	20		3,315	0,223	0	71,432	0,595	0
25	24		3,292	0,200	0	42,858	0,357	0
26	28		3,259	0,197	0	14,293	0,117	0
27	32		3,226	0,183	0	7,413	0,060	0
28	36		3,193	0,170	0	7,413	0,060	0

Tabel 4.16a. Koefisien Thermal dan Higroskopis Lamina

Koefisien Thermal dan Higroskopis Masing-Masing Lamina

No.	Kadar	Orientasi	α_x	α_y	α_{xy}	β_x	β_y	β_{xy}
	Air (%)	Sudut	1E-5 mm/mm	1E-5 mm/mm	1E-5 mm/mm	1E-5 mm/mm	1E-5 mm/mm	1E-5 mm/mm
29	12	-30	1,027	2,581	-1,346	32,946	96,696	-55,209
30	16		1,012	2,563	-1,343	25,625	75,208	-42,940
31	20		0,996	2,542	-1,339	18,304	53,720	-30,672
32	24		0,981	2,522	-1,335	10,982	32,232	-18,403
33	28		0,962	2,493	-1,326	3,661	10,744	-6,134
34	32		0,944	2,465	-1,318	1,830	5,372	-3,067
35	36		0,926	2,437	-1,309	1,030	5,372	-3,067
36	12	-45	1,804	1,804	-1,554	64,821	64,821	-63,750
37	16		1,787	1,787	-1,551	50,417	50,417	-49,583
38	20		1,769	1,769	-1,546	36,012	36,012	-35,417
39	24		1,751	1,751	-1,541	21,607	21,607	-21,250
40	28		1,728	1,728	-1,531	7,202	7,202	-7,003
41	32		1,705	1,705	-1,521	3,601	3,601	-3,542
42	36		1,682	1,682	-1,511	3,601	3,601	-3,542
43	12	-60	2,581	1,027	-1,346	96,696	32,946	-55,209
44	16		2,563	1,012	-1,343	75,208	25,625	-42,940
45	20		2,542	0,996	-1,339	53,720	18,304	-30,672
46	24		2,522	0,981	-1,335	32,232	10,982	-18,403
47	28		2,493	0,962	-1,326	10,744	3,661	-6,134
48	32		2,465	0,944	-1,318	5,372	1,830	-3,067
49	36		2,437	0,926	-1,309	5,372	1,830	-3,067

Tabel 4.16b. Koefisien Thermal dan Higroskopis Lamina

4.3.4. Resultan Gaya yang Terjadi pada Uji Tarik

Untuk mencari seberapa besar gaya-gaya dan momen-momen yang terjadi sebagai akibat dari luar, akibat dari perubahan temperatur dan kadar airnya dapat dicari dengan persamaan (2.28), (2.29) dan (2.30).

4.3.4.1. Gaya per satuan panjang akibat pembebanan (N^A_x)

Diperoleh dari persamaan (2.30) berupa gaya per satuan panjang dengan asumsi ketebalan laminat adalah 3 mm. Gaya ini besarnya hanya searah dengan sumbu X pengujian saja, untuk arah yang lain diasumsikan nol. Besar gaya per satuan panjang dapat dilihat pada halaman 91.

4.3.4.2. Gaya Higrothermal

Besarnya gaya higrothermal adalah gabungan dari gaya akibat perubahan temperatur dan kadar airnya. Gaya thermal didapatkan melalui persamaan (2.28) dan gaya higroskopis didapatkan dengan persamaan (2.29). Besarnya masing-masing dapat dilihat pada halaman 92 dan 93.

G A Y A A K I B A T P E M B E B A N A N (N A x)

No.	Kadar Air (%)	Gaya (Nax) (Kg/mm ² mm)							
		90/0/90	-60/0/60	-45/0/45	-30/0/30	-60/90/60	-45/90/45	-30/90/30	0/90/0
1	12	10,988	8,541	4,288	10,813	3,897	8,687	12,062	12,457
2	16	13,025	10,580	4,511	12,228	4,433	13,027	14,150	14,180
3	20	14,774	12,160	4,774	12,315	4,257	12,150	14,075	14,362
4	24	15,751	13,060	5,009	13,270	4,570	15,887	15,670	15,942
5	28	15,958	13,242	7,890	15,176	4,859	16,256	15,789	16,470
6	32	16,290	9,970	9,314	14,665	5,732	13,649	16,395	22,318
7	36	11,651	9,734	4,970	12,081	4,822	14,685	11,480	13,641

Tabel 4.17. Gaya akibat pembebanan (Nax)

Gaya Thermal dan Higroskopis

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Gaya Thermal (Kg/mm ² mm)			Gaya Higroskopis (Kg/mm ² mm)		
			NTx (0,1)	NTy (0,1)	NTxy (0,1)	NHx (0,1)	NHy (0,1)	NHxy
1	12	90/0/90	0	0	0	2,192	1,736	0
2	16		-1,148	-0,694	0	2,273	1,800	0
3	20		-2,266	-1,987	0	2,029	1,607	0
4	24		-3,042	-2,538	0	1,461	1,157	0
5	28		-4,413	-3,671	0	0,568	0,450	0
6	32		-5,434	-4,507	0	0,325	0,257	0
7	36		-6,436	-5,320	0	0,365	0,289	0
8	12	-60/0/60	0	0	0	2,403	2,324	0
9	16		-1,294	-1,221	0	2,575	2,411	0
10	20		-2,555	-2,410	0	2,299	2,152	0
11	24		-3,431	-3,235	0	1,656	1,558	0
12	28		-4,978	-4,692	0	0,644	0,603	0
13	32		-6,132	-5,777	0	0,368	0,344	0
14	36		-7,261	-6,840	0	0,414	0,387	0
15	12	-45/0/45	0	0	0	2,323	2,778	0
16	16		-1,292	-1,417	0	2,409	2,801	0
17	20		-2,491	-2,801	0	2,151	2,573	0
18	24		-3,262	-3,766	0	1,549	1,852	0
19	28		-4,79	-5,478	0	0,063	0,720	0
20	32		-5,819	-6,746	0	0,344	0,412	0
21	36		-6,886	-8,001	0	0,387	0,463	0
22	12	-30/0/30	0	0	0	1,869	2,939	0
23	16		-1,037	-1,478	0	1,938	3,048	0
24	20		-2,041	-2,295	0	1,730	2,721	0
25	24		-2,731	-3,935	0	1,246	1,959	0
26	28		-3,950	-5,720	0	0,485	0,762	0
27	32		-4,849	-7,060	0	0,277	0,435	0
28	36		-5,725	-8,379	0	0,311	0,490	0

Tabel 4.18. Gaya Thermal dan Higroskopis

Gaya Thermal dan Higroskopis

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Gaya Thermal (Kg/mm ² mm)			Gaya Higroskopis (Kg/mm ² mm)		
			NTx (0,1)	NTy (0,1)	NTxy (0,1)	NHx (0,1)	NHy (0,1)	NHxy
29	12		0	0	0	2,939	1,869	0
30	16		-1,478	-1,037	0	3,048	1,938	0
31	20		-2,925	-2,041	0	2,721	1,730	0
32	24	-60/90/60	-3,935	-2,731	0	1,959	1,246	0
33	28		-5,720	-3,950	0	0,762	0,485	0
34	32		-7,060	-4,843	0	0,345	0,277	0
35	36		-0,300	-5,725	0	0,490	0,311	0
36	12		0	0	0	2,770	2,322	0
37	16		-1,417	-1,232	0	2,801	2,409	0
38	20		-2,801	-2,431	0	2,573	2,151	0
39	24	-45/90/45	-3,766	-3,262	0	1,852	1,548	0
40	28		-5,470	-4,720	0	0,720	0,602	0
41	32		-6,746	-5,819	0	0,412	0,344	0
42	36		-0,001	-6,886	0	0,463	0,387	0
43	12		0	0	0	2,324	2,483	0
44	16		-1,221	-1,294	0	2,411	2,575	0
45	20		-2,410	-2,555	0	2,152	2,299	0
46	24	-30/90/30	-3,324	-3,431	0	1,155	1,656	0
47	28		-4,692	-4,978	0	0,063	0,644	0
48	32		-5,778	-6,132	0	0,344	0,368	0
49	36		-6,840	-7,264	0	0,387	0,414	0
50	12		0	0	0	1,736	2,192	0
51	16		-0,964	-1,148	0	1,800	2,273	0
52	20		-1,987	-2,267	0	1,607	2,029	0
53	24	0/90/0	-2,538	-3,042	0	1,157	1,461	0
54	28		-3,671	-4,413	0	0,450	0,568	0
55	32		-4,587	-5,435	0	0,257	0,325	0
56	36		-5,320	-6,436	0	0,289	0,365	0

Tabel 4.19. Gaya Thermal dan Higroskopis

4.3.4.4. Total Gaya

Total gaya yang terjadi adalah jumlah semua gaya-gaya yang terjadi. Yaitu gaya dari pembebanan, gaya pengaruh kadar air, maupun gaya dari perubahan temperatur. Didapatkan melalui persamaan (2.47). Besarnya masing-masing dapat dilihat pada halaman 95 dan 96.

4.3.5. Perhitungan Momen yang Terjadi pada Bending

Jumlah momen yang terjadi sebagai akibat perubahan kadar air, temperatur dan pembebanan yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan (2.31), (2.32), (2.33) dan (2.38). Dari persamaan (2.31) didapatkan bahwa besarnya momen yang ditimbulkan oleh perubahan temperatur searah sumbu X dan sumbu Y adalah nol. Demikian juga momen yang ditimbulkan oleh perubahan kadar airnya. Besarnya masing-masing dapat dilihat pada halaman 97.

Gaya Total

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Gaya Total (Kg/mm ² mm)		
			Nx	Ny (0,1)	Nxy
1	12	90/0/90	11,208	1,736	0
2	16		13,137	0,837	0
3	20		14,750	-0,289	0
4	24		15,592	-1,381	0
5	28		15,573	-3,221	0
6	32		15,779	-4,250	0
7	36		11,044	-5,031	0
8	12	-60/0/60	8,789	2,324	0
9	16		10,709	1,189	0
10	20		12,134	-0,258	0
11	24		12,882	-1,685	0
12	28		12,808	-4,089	0
13	32		9,393	-5,433	0
14	36		9,049	-6,453	0
15	12	-45/0/45	4,520	2,778	0
16	16		4,629	1,464	0
17	20		4,666	-0,229	0
18	24		4,837	-1,914	0
19	28		7,495	-4,750	0
20	32		8,767	-6,335	0
21	36		4,320	-7,538	0
22	12	-30/0/30	10,999	2,939	0
23	16		12,318	1,570	0
24	20		12,204	-0,204	0
25	24		13,122	-1,976	0
26	28		14,029	-4,950	0
27	32		14,200	-6,625	0
28	36		11,521	-7,890	0

Tabel 4.20. Gaya Total

Gaya Total

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Gaya Total (Kg/mm ² mm)		
			Nx	Ny (0,1)	Nxy
29	12	-60/90/60	4,191	1,869	0
30	16		4,583	0,901	0
31	20		4,237	-0,310	0
32	24		4,373	-1,485	0
33	28		4,363	-3,465	0
34	32		5,609	-4,573	0
35	36		4,033	-5,413	0
36	12	-45/90/45	8,885	2,322	0
37	16		13,173	1,176	0
38	20		12,127	-0,281	0
39	24		15,696	-1,713	0
40	28		15,781	-4,126	0
41	32		13,015	-5,475	0
42	36		13,931	-6,498	0
43	12	-30/90/30	12,294	2,483	0
44	16		14,269	1,281	0
45	20		14,049	-2,256	0
46	24		15,531	-1,775	0
47	28		15,380	-4,334	0
48	32		15,851	-5,764	0
49	36		10,835	-6,850	0
50	12	0/90/0	12,631	2,191	0
51	16		14,264	-1,125	0
52	20		14,339	-0,232	0
53	24		15,804	-1,581	0
54	28		16,148	-3,045	0
55	32		21,093	-5,110	0
56	36		13,130	-6,071	0

Tabel 4.21. Gaya Total

MOMEN THERMAL DAN HIGROSKOPIS ($\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$)

NO.	% AIR	ORIENTASI SUDUT ($^{\circ}$)	MOMEN THERMAL $M_{xy}^T (10^{-2})$	MOMEN HIGROSKOPIS $M_{xy}^H (10^{-2})$
1.	12	90/0/90	0	0
2.	16	90/0/90	0	0
3.	20	90/0/90	0	0
4.	24	90/0/90	0	0
5.	28	90/0/90	0	0
6.	32	90/0/90	0	0
7.	36	90/0/90	0	0
8.	12	-60/0/60	0	7,598
9.	16	-60/0/60	-3,692	7,880
10.	20	-60/0/60	-7,319	7,035
11.	24	-60/0/60	-9,866	5,064
12.	28	-60/0/60	-14,368	1,970
13.	32	-60/0/60	-17,769	1,126
14.	36	-60/0/60	-21,131	1,266
15.	12	-45/0/45	0	8,244
16.	16	-45/0/45	-4,020	8,550
17.	20	-45/0/45	-7,969	7,634
18.	24	-45/0/45	-10,740	5,496
19.	28	-45/0/45	-15,638	2,137
20.	32	-45/0/45	-19,335	1,221
21.	36	-45/0/45	-22,989	1,374
22.	12	-30/0/30	0	7,598
23.	16	-30/0/30	-3,692	7,880
24.	20	-30/0/30	-7,319	7,035
25.	24	-30/0/30	-9,866	5,065
26.	28	-30/0/30	-14,368	1,970
27.	32	-30/0/30	-17,769	1,126
28.	36	-30/0/30	-21,131	1,266

Tabel 4.22. Momen Thermal dan Higroskopis

Besar momen higroskopis dan momen thermal orientasi sudut yang lain sama besarnya seperti orientasi sudut sebelumnya. Yaitu untuk orientasi sudut $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$ sama dengan $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$, untuk orientasi sudut $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$

sama seperti $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$, untuk orientasi sudut $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$ sama seperti $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$, serta untuk orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ sama seperti $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$. Momen akibat pembebanan besarnya diperoleh dari persamaan (2. 33).

NO.	% AIR	ORIENTASI SUDUT ($^{\circ}$)	M O M E N T O T A L		
			Mx	My	M xy (10^{-2})
1.	12	90/0/90	14,167	0	0
2.	16	90/0/90	14,727	0	0
3.	20	90/0/90	15,175	0	0
4.	24	90/0/90	15,217	0	0
5.	28	90/0/90	15,510	0	0
6.	32	90/0/90	15,904	0	0
7.	36	90/0/90	16,168	0	0
8.	12	-60/0/60	15,801	0	7,598
9.	16	-60/0/60	16,028	0	4,188
10.	20	-60/0/60	17,578	0	-0,284
11.	24	-60/0/60	19,099	0	-4,801
12.	28	-60/0/60	19,303	0	-12,398
13.	32	-60/0/60	20,438	0	-16,644
14.	36	-60/0/60	20,575	0	-19,865
15.	12	-45/0/45	12,889	0	8,244
16.	16	-45/0/45	18,756	0	4,530
17.	20	-45/0/45	20,037	0	-0,335
18.	24	-45/0/45	21,178	0	-5,244
19.	28	-45/0/45	23,741	0	-13,501
20.	32	-45/0/45	24,378	0	-18,114
21.	36	-45/0/45	24,005	0	-21,615
22.	12	-30/0/30	19,465	0	7,598
23.	16	-30/0/30	21,886	0	4,188
24.	20	-30/0/30	22,426	0	-0,284
25.	24	-30/0/30	20,434	0	-4,801
26.	28	-30/0/30	25,087	0	-12,398
27.	32	-30/0/30	25,218	0	-16,643
28.	36	-30/0/30	25,486	0	-19,865

Tabel 4. 23. Momen total ($\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$)

		ORIENTASI SUDUT (°)	M O M E N T O T A L		
			Mx	My	Mxy
29.	12	-60/90/60	15,802	0	7,598
30.	16	-60/90/60	16,344	0	4,188
31.	20	-60/90/60	16,867	0	-0,284
32.	24	-60/90/60	16,908	0	-4,801
33.	28	-60/90/60	17,399	0	-12,398
34.	32	-60/90/60	18,963	0	-16,643
35.	36	-60/90/60	19,166	0	-19,865
36.	12	-45/90/45	19,106	0	8,244
37.	16	-45/90/45	20,259	0	4,530
38.	20	-45/90/45	20,388	0	-0,335
39.	24	-45/90/45	23,260	0	-5,244
40.	28	-45/90/45	23,411	0	-12,398
41.	32	-45/90/45	23,476	0	-18,114
42.	36	-45/90/45	23,590	0	-21,615
43.	12	-30/90/30	20,367	0	7,598
44.	16	-30/90/30	21,479	0	4,188
45.	20	-30/90/30	26,235	0	-0,284
46.	24	-30/90/30	23,258	0	-4,801
47.	28	-30/90/30	23,588	0	-12,399
48.	32	-30/90/30	23,725	0	-16,643
49.	36	-30/90/30	24,736	0	-19,865
50.	12	0/90/0	13,668	0	0
51.	16	0/90/0	16,253	0	0
52.	20	0/90/0	17,679	0	0
53.	24	0/90/0	18,330	0	0
54.	28	0/90/0	18,494	0	0
55.	32	0/90/0	18,868	0	0
56.	36	0/90/0	20,413	0	0

Tabel 4.24. Momen Total (lanjutan) (kg/mm² . mm)

4.3.6. Perbandingan Regangan dan Kelengkungan Teoritis dan Hasil Pengujian

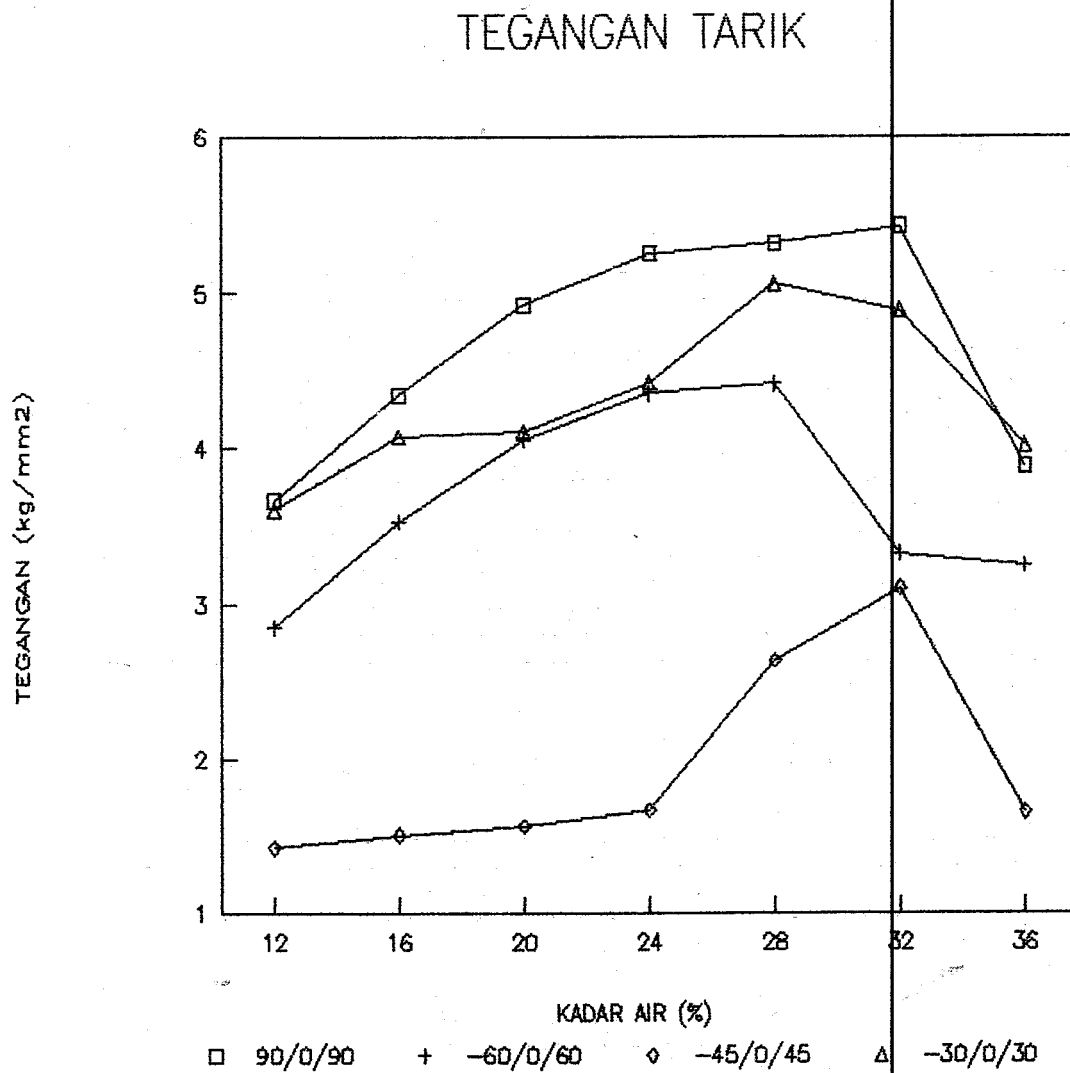
Setelah ditemukan semua gaya dan momen yang terjadi, kemudian didapatkan regangan tarik dan kelengkungan bending teoritisnya.

Regangan tarik yang didapatkan adalah regangan searah sumbu X, untuk dibandingkan dengan regangan sebenarnya. Untuk regangan searah sumbu Y tidak dibahas dalam penelitian ini, karena keterbatasan peralatan uji di lapangan. Demikian juga untuk pengujian bending, didapatkan kelengkungan searah sumbu X (sesuai dengan arah pembebanan). Untuk arah Y diasumsikan nol, karena tidak terjadi kelengkungan sumbu Y selama pengujian (penyangga searah sumbu Y).

Regangan tarik bidang tengah dicari dengan persamaan (2.15) dengan asumsi bahwa tidak terjadi kelengkungan selama pengujian. Dengan nilai k_x , k_y adalah nol, maka matriks kelengkungan $[k]$ jika dikalikan dengan matriks $[B]$ hasilnya akan nol.

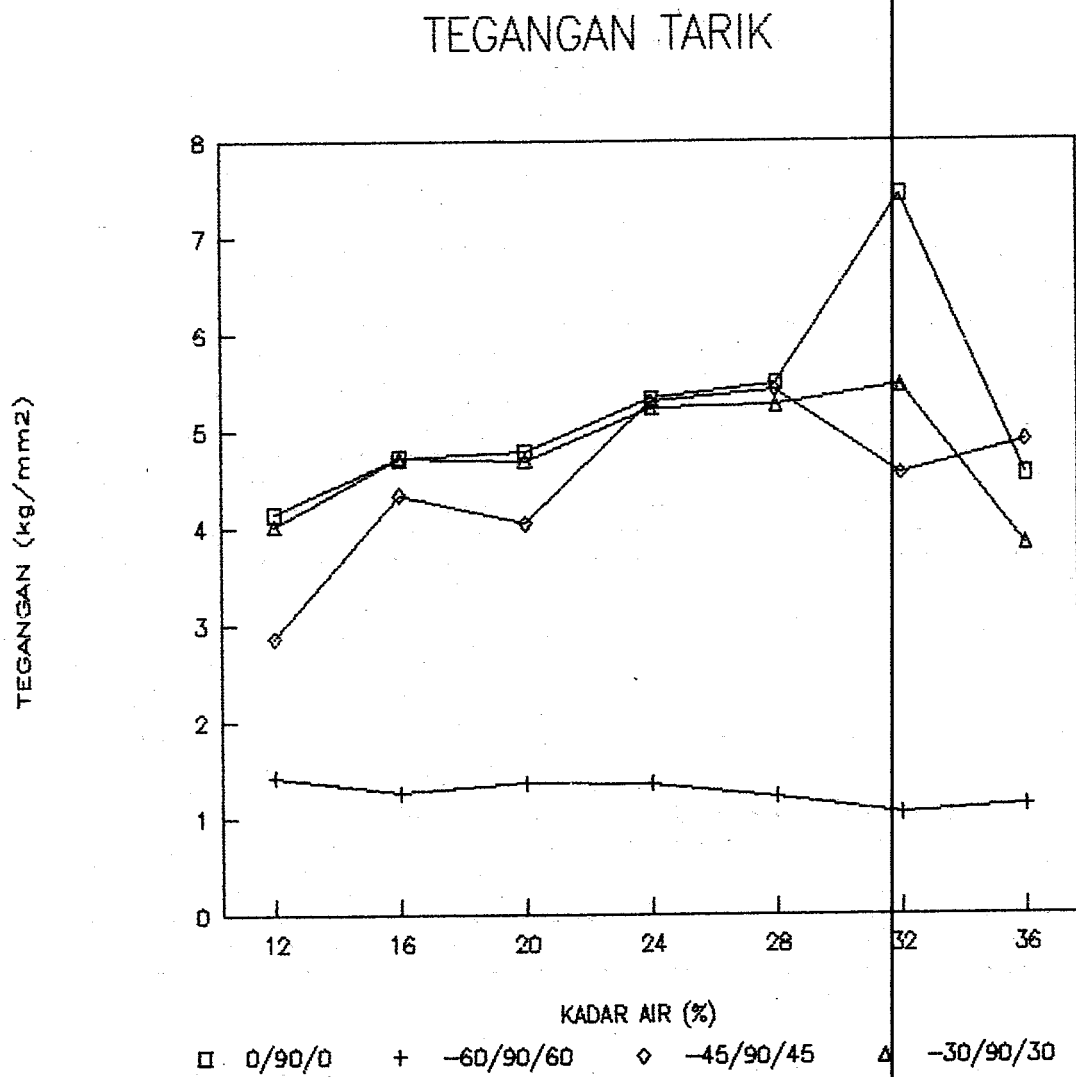
Kelengkungan bidang tengah didapatkan dengan persamaan (2.16). Di sini terjadi kelengkungan mekanik, thermal dan higroskopik. Demikian juga dengan terjadinya regangan searah dengan sumbu X akibat bending, maka matriks $[A]$ masih dapat terpakai. Setelah itu dapat ditemukan kelengkungan bending teoritisnya.

4.3.6.1. Tegangan Tarik



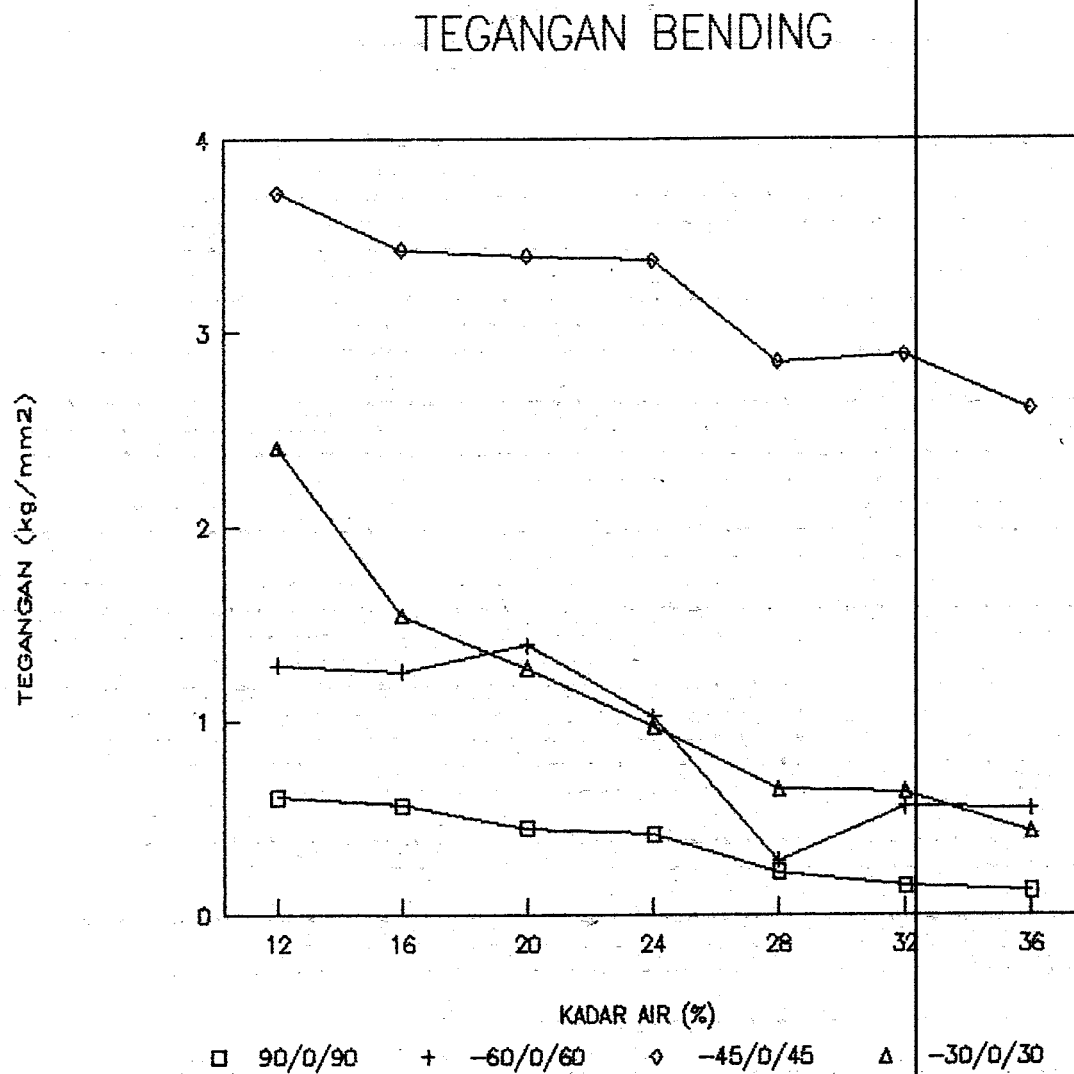
Gambar 4.1. Tegangan Tarik 1

Hal 69



Gambar 4.2. Tegangan Tarik 2

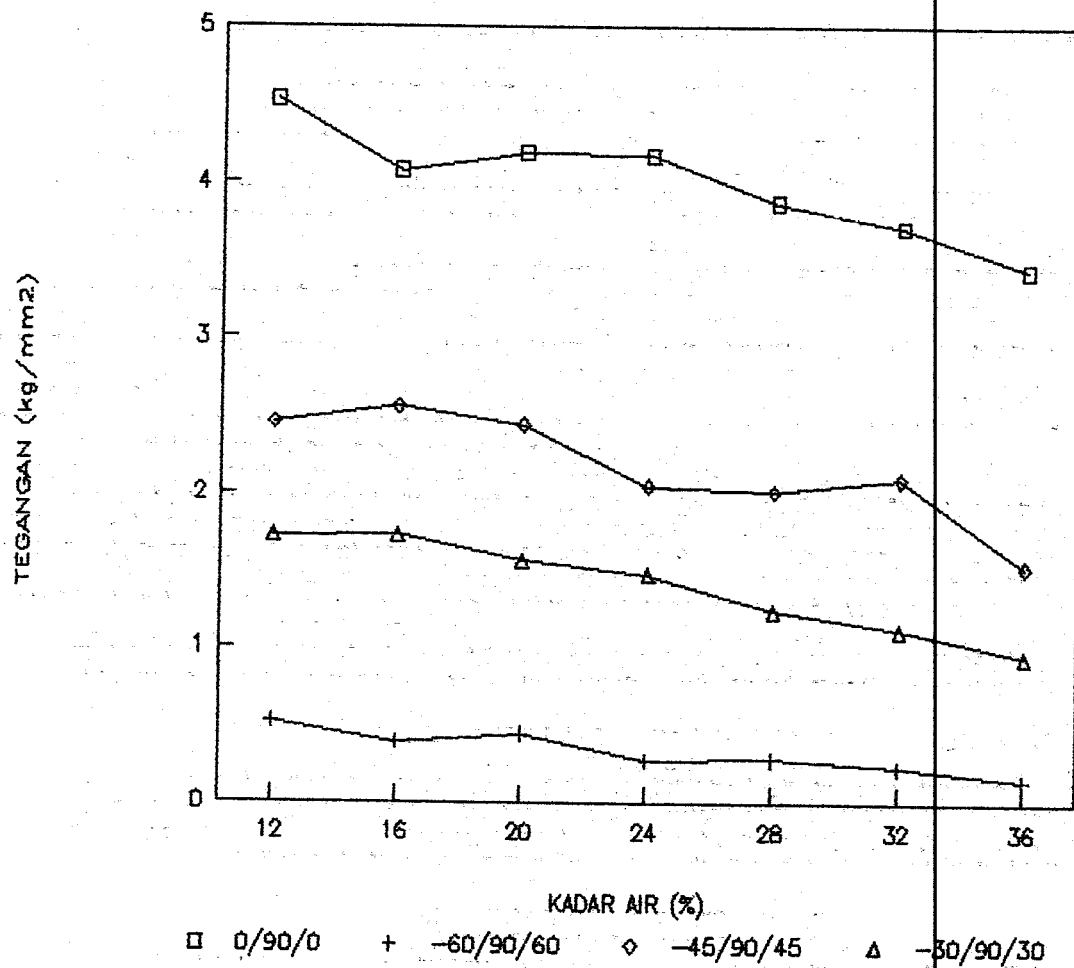
4.3.6.2. Tegangan Bending



Gambar 4.3. Tegangan Bending (1)

Rizky

TEGANGAN BENDING



Gambar 4.4. Tegangan Bending (2)

4.3.6.2. Tabel Perbandingan Regangan dan Kelengkungan

PERBANDINGAN REGANGAN DAN KELENGKUNGAN						
No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Regangan $\times (1E-3 \text{ mm/mm})$		Kelengkungan $\times (1E-3/\text{mm})$	
			Teoritis	Aktual	Teoritis	Aktual
1	12	90/0/90	5,622	7,047	12,085	12,791
2	16		6,607	9,027	12,554	13,252
3	20		7,437	9,464	12,942	13,621
4	24		7,878	9,541	12,976	13,656
5	28		7,895	11,045	13,226	13,901
6	32		8,014	23,960	13,563	14,227
7	36		5,640	17,991	13,005	14,467
8	12	-60/0/60	3,737	5,567	10,198	10,972
9	16		4,574	6,521	10,347	11,119
10	20		5,203	7,046	11,347	12,099
11	24		5,541	7,042	12,329	13,078
12	28		5,639	23,137	12,959	13,179
13	32		4,029	25,111	13,193	13,922
14	36		3,957	8,544	13,280	13,974
15	12	-45/0/45	1,702	2,518	10,471	10,976
16	16		1,759	2,500	10,085	11,648
17	20		1,794	2,500	11,023	11,762
18	24		1,079	4,026	12,774	13,473
19	28		2,929	4,529	12,047	13,565
20	32		3,439	5,553	12,983	13,880
21	36		1,747	2,996	13,347	14,036
22	12	-30/0/30	3,902	3,017	9,448	10,153
23	16		4,392	4,498	10,547	11,255
24	20		4,482	7,026	10,085	11,565
25	24		4,725	9,163	11,666	12,354
26	28		5,375	16,500	12,177	12,816
27	32		5,174	22,590	12,489	13,127
28	36		4,220	9,001	12,474	13,101

Tabel 4.25 Perbandingan Regangan dan Kelengkungan

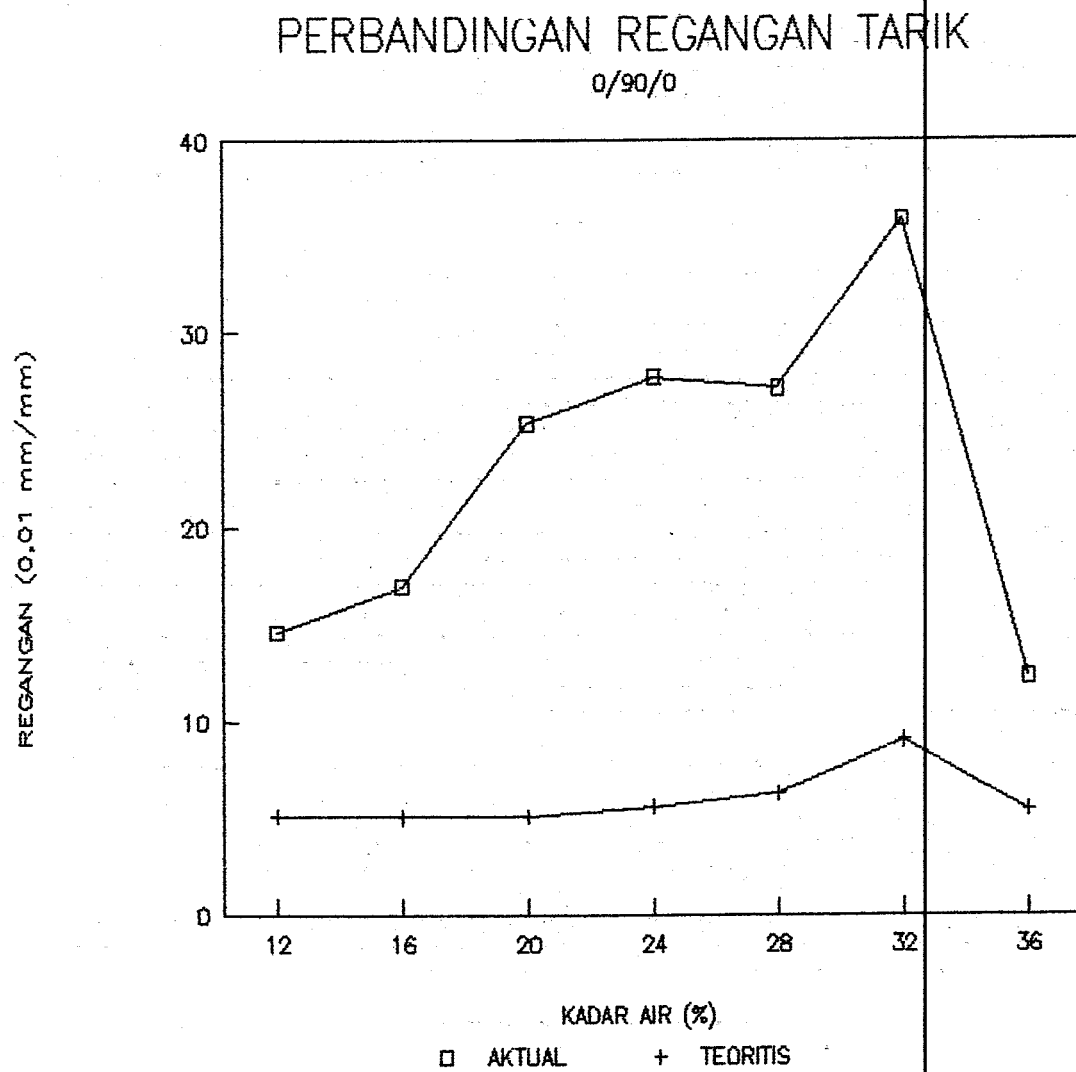
Lanjutan

PERBANDINGAN REGANGAN DAN KELENGKUNGAN

No.	Kadar Air (%)	Orientasi Sudut	Regangan $\times (1E-3 \text{ mm/mm})$		Kelengkungan $\times (1E-3/\text{mm})$	
			Teoritis	Aktual	Teoritis	Aktual
29	12	-30/90/30	5,237	9,081	10,111	10,926
30	16		6,098	7,527	10,623	11,420
31	20		6,023	7,535	11,407	12,193
32	24		6,677	12,514	11,505	12,276
33	28		6,644	12,689	11,494	12,436
34	32		6,863	36,650	11,734	12,500
35	36		4,727	10,316	12,234	13,012
36	12	-45/90/45	4,136	4,482	10,566	11,331
37	16		6,159	6,528	11,205	11,957
38	20		5,867	8,438	11,275	12,027
39	24		7,376	11,994	12,919	13,630
40	28		7,444	13,645	12,947	13,654
41	32		6,161	28,361	12,983	13,700
42	36		6,605	6,953	13,046	13,761
43	12	-60/90/60	2,231	3,016	10,471	11,166
44	16		2,455	5,026	10,830	11,492
45	20		2,285	5,000	11,177	11,860
46	24		2,373	5,930	11,265	11,868
47	28		2,393	12,965	11,529	12,178
48	32		2,707	10,444	12,565	13,197
49	36		2,241	9,429	12,700	13,303
50	12	0/90/0	5,141	14,570	6,460	7,257
51	16		5,825	16,941	7,601	8,460
52	20		5,874	25,332	8,357	9,135
53	24		6,496	27,167	8,522	9,297
54	28		6,671	27,714	8,797	9,572
55	32		9,043	35,905	8,917	9,600
56	36		5,471	12,290	9,647	10,399

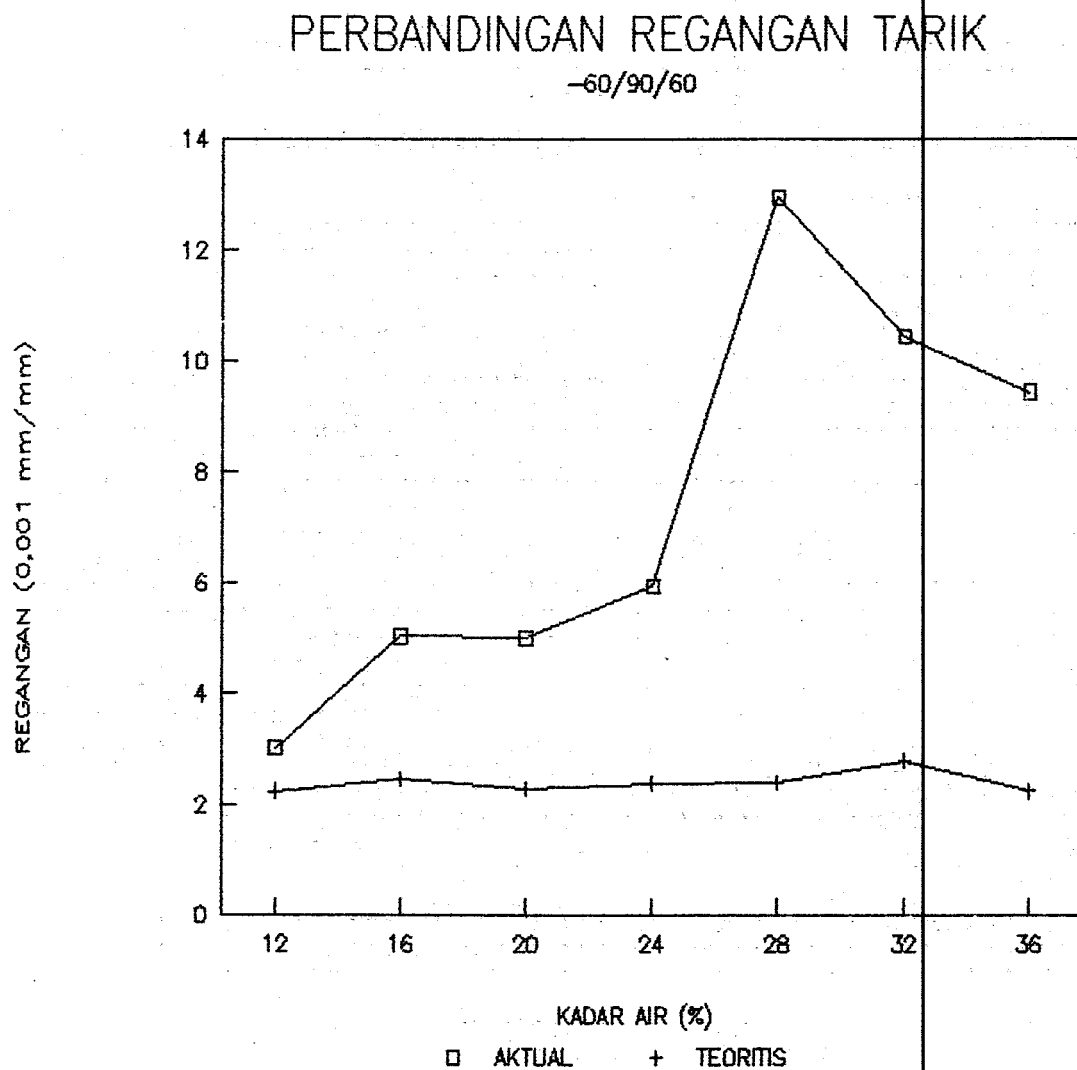
Tabel 4.25 Perbandingan Regangan dan Kelengkungan

4.3.6.3. Regangan

a. Orientasi sudut $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 

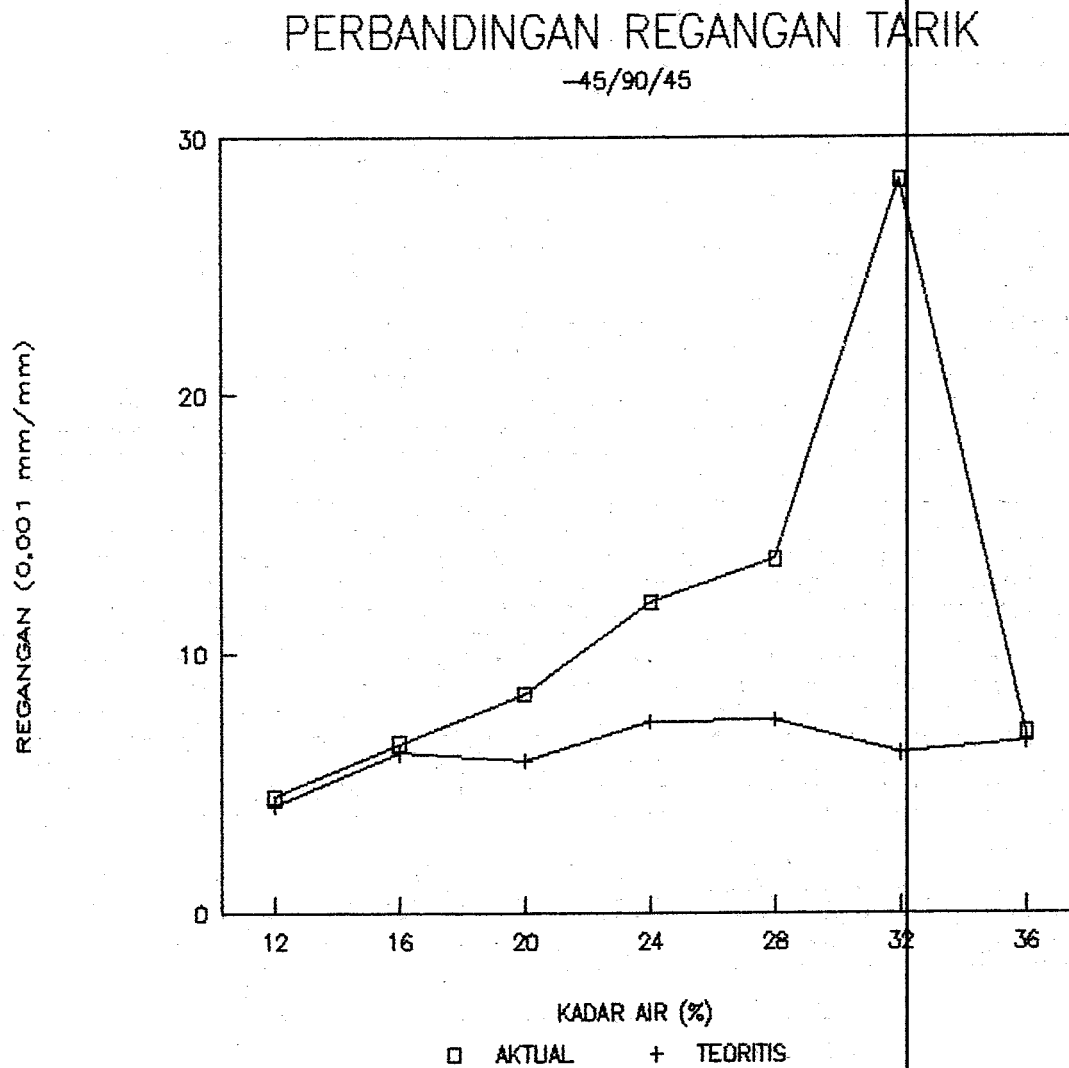
Gambar 4.5. Perbandingan Regangan Tarik Laminat 0/90/0

b. Orientasi sudut $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$



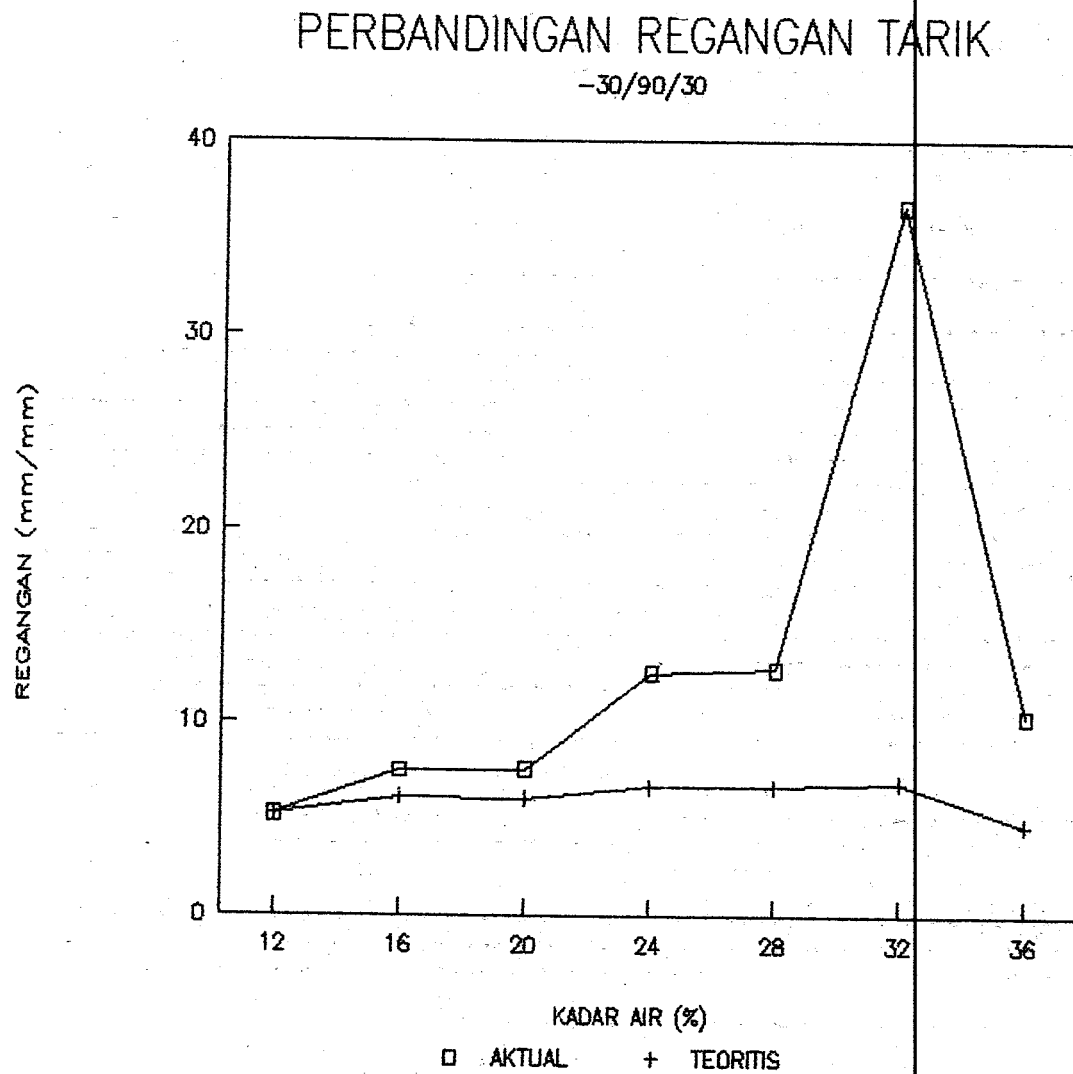
Gambar 4.6. Perbandingan Regangan Laminat -60/90/60

c. Orientasi sudut $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$



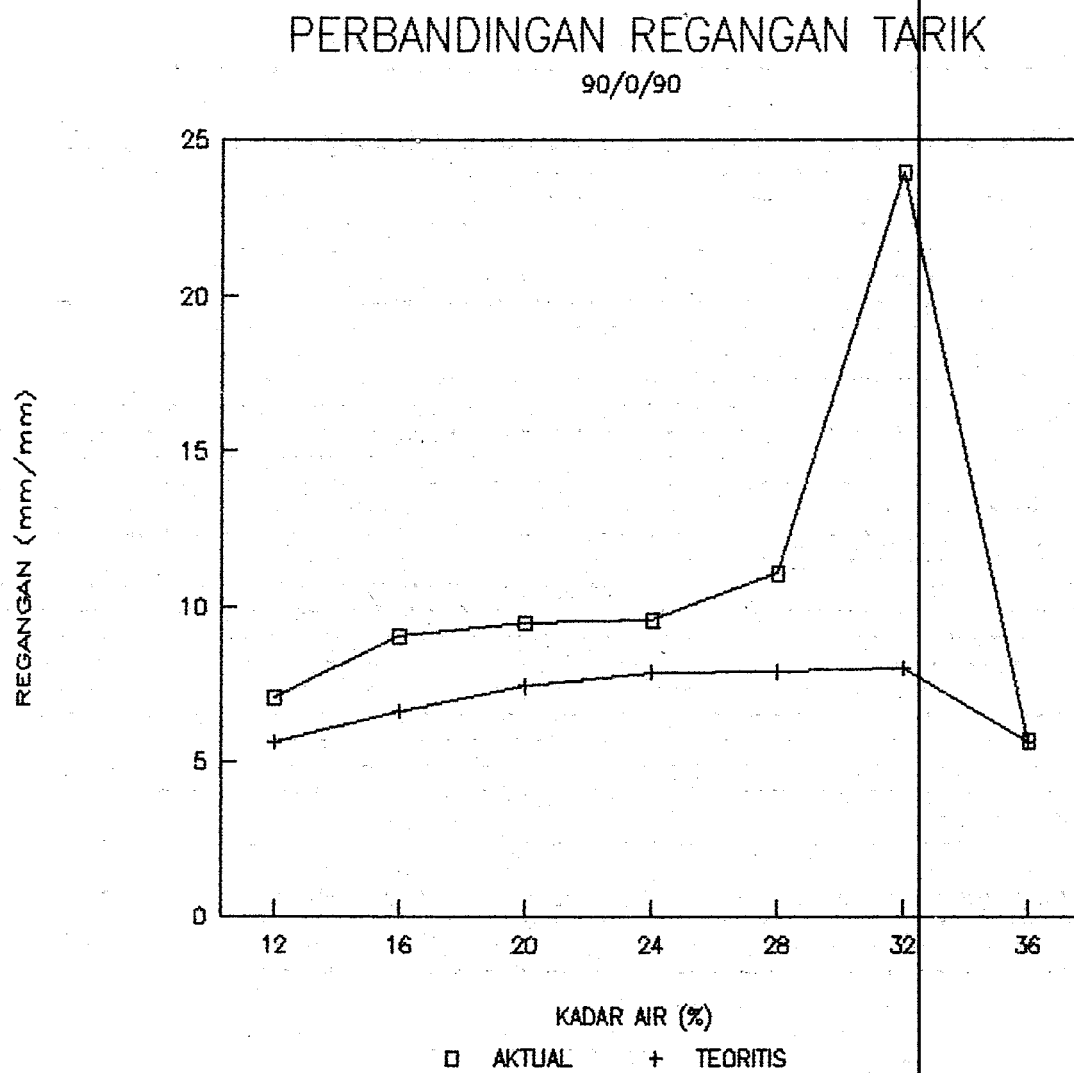
Gambar 4.7. Perbandingan Regangan Laminat $-45/90/45$

d. Orientasi sudut $-30^\circ/90^\circ/30^\circ$



Gambar 4.8. Perbandingan Regangan Laminat $-30/90/30$

e. Orientasi sudut $90^\circ/0^\circ/90^\circ$

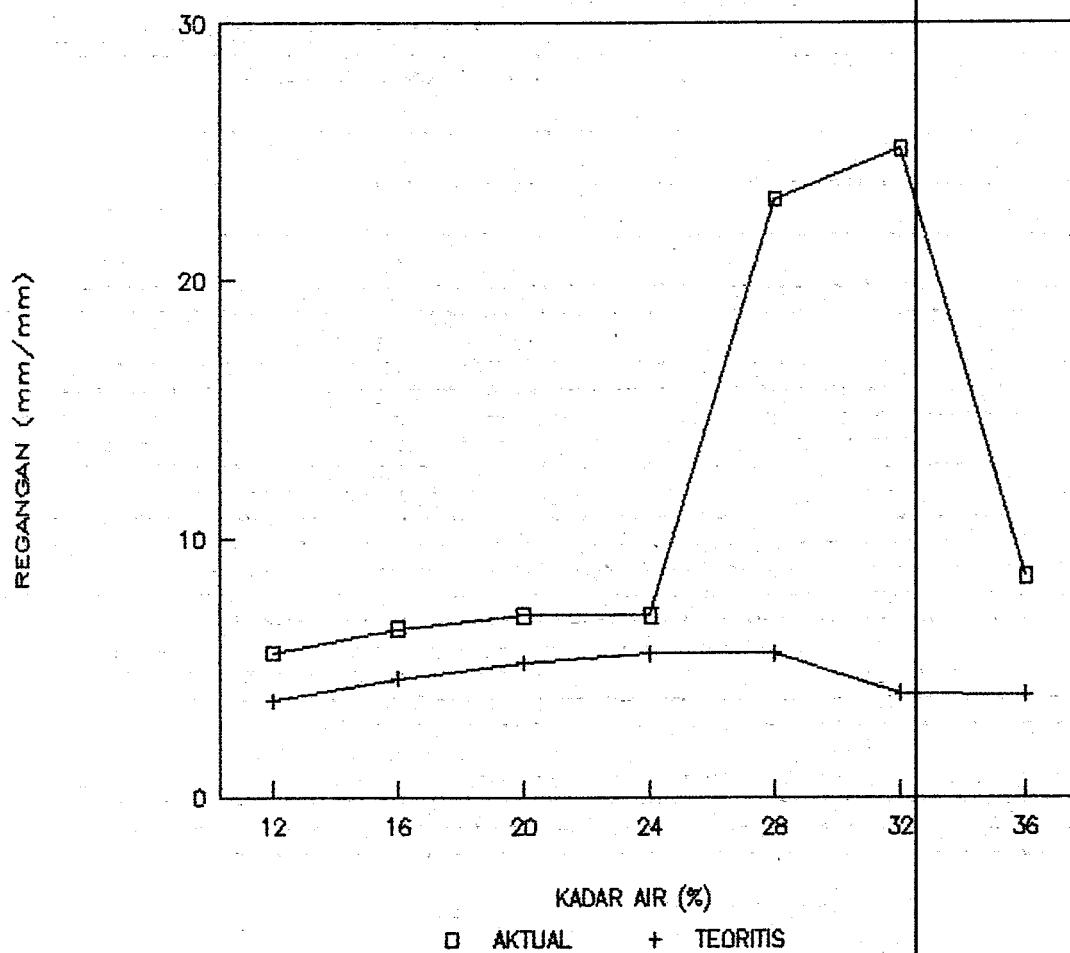


Gambar 4.9. Perbandingan Regangan Laminat 90/0/90

f. Orientasi sudut $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$

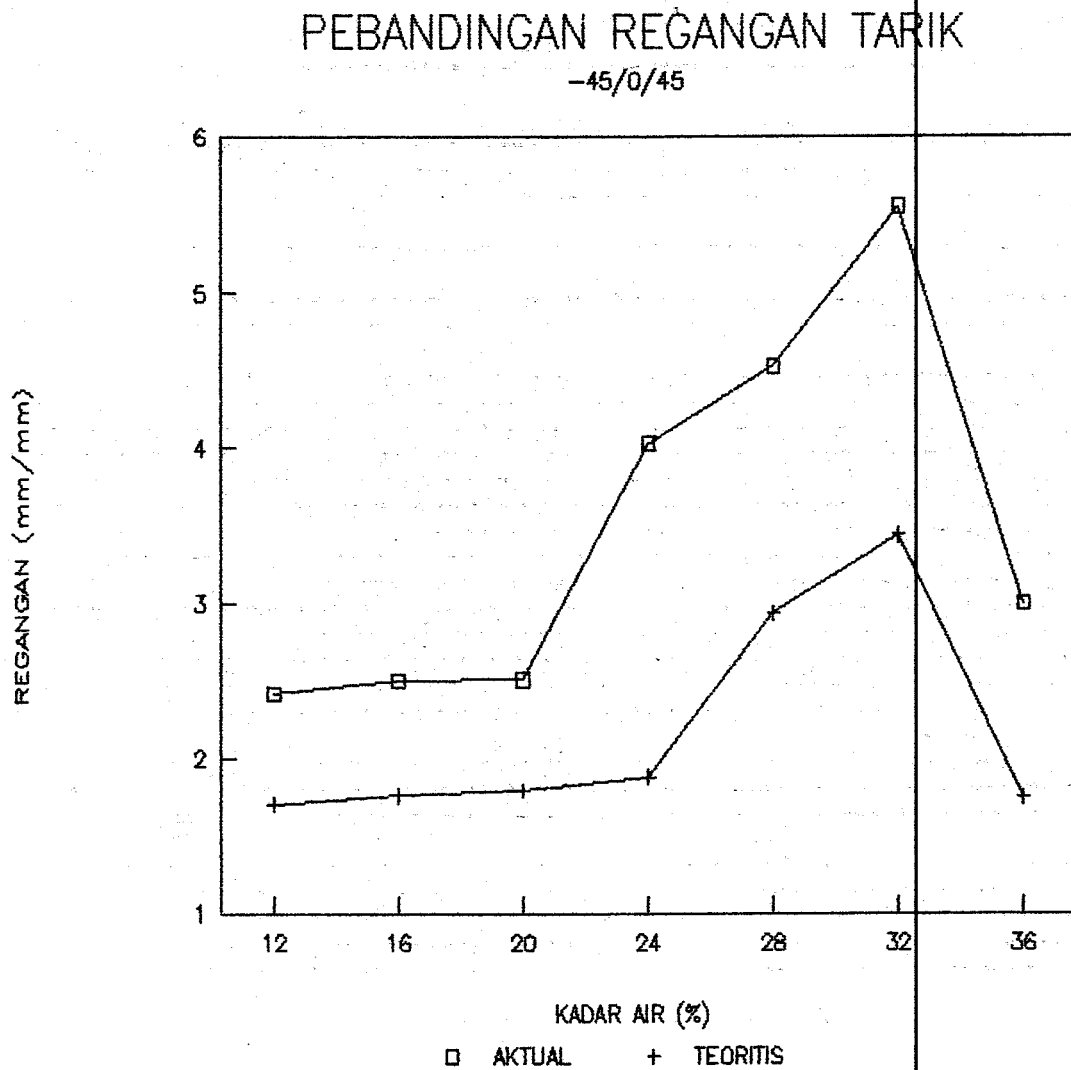
PERBANDINGAN REGANGAN TARIK

$-60/0/60$



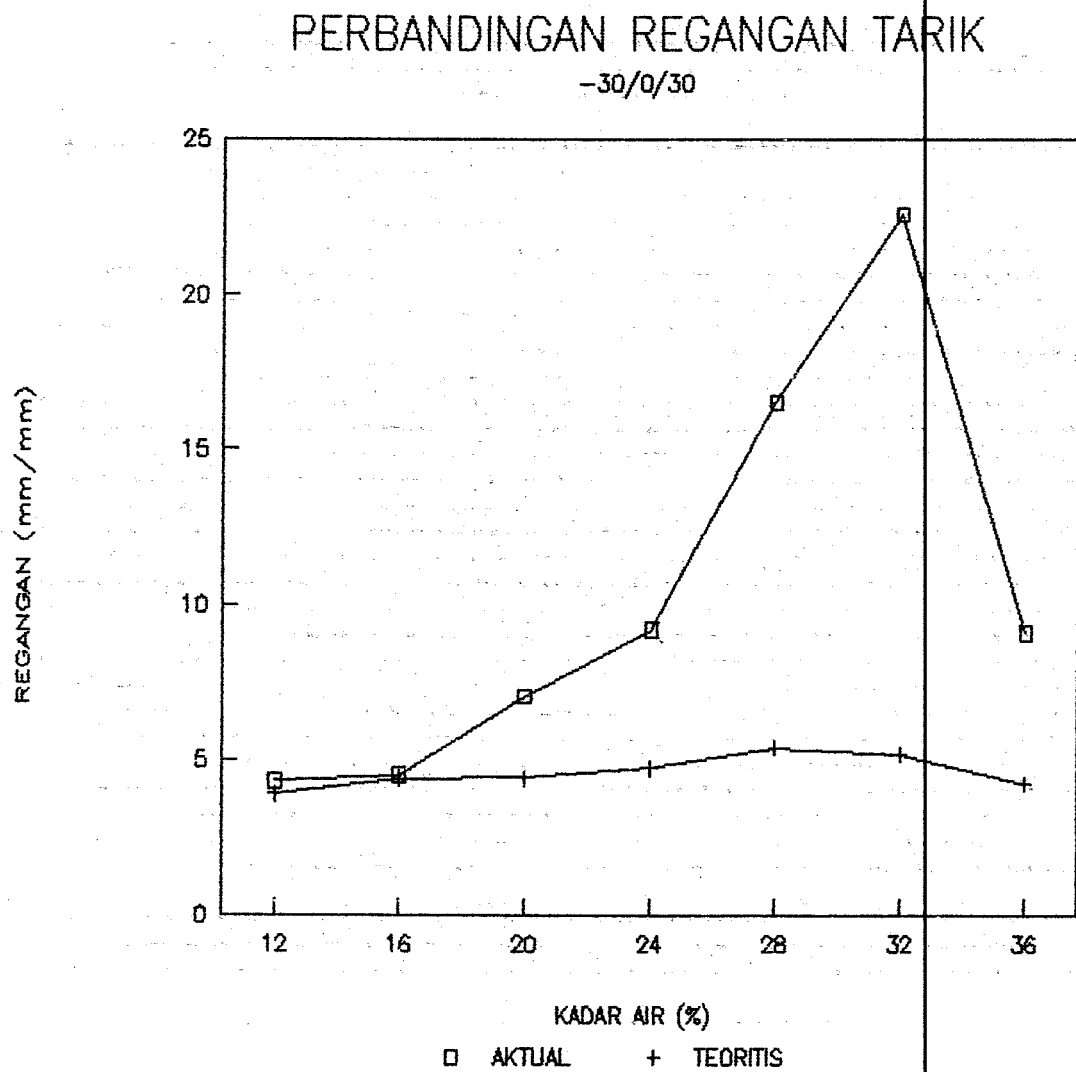
Gambar 4. 10. Perbandingan Regangan Laminat $-60/0/60$

g. Orientasi sudut $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$



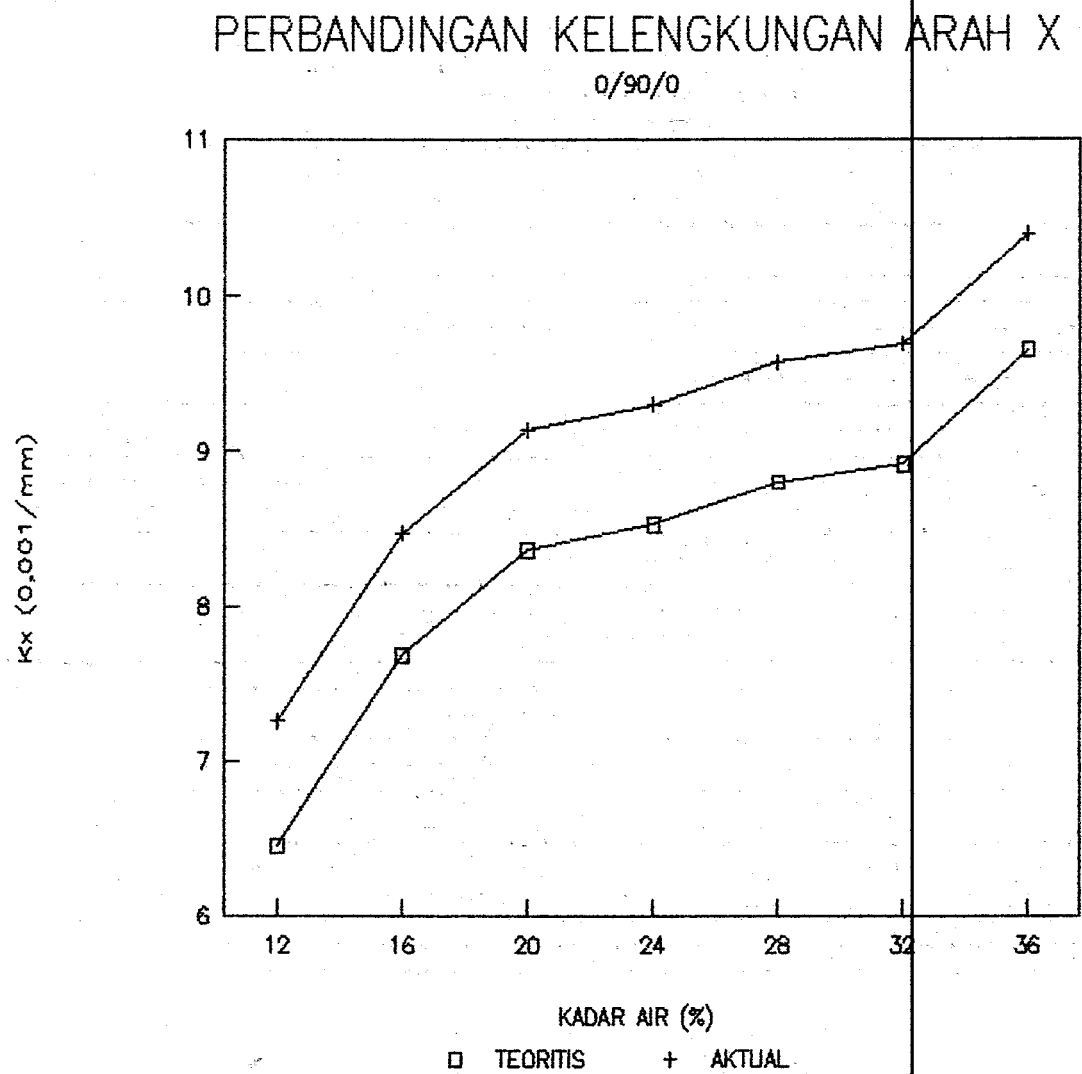
Gambar 4.11. Perbandingan Regangan Laminat -45/0/45

h. Orientasi sudut $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$



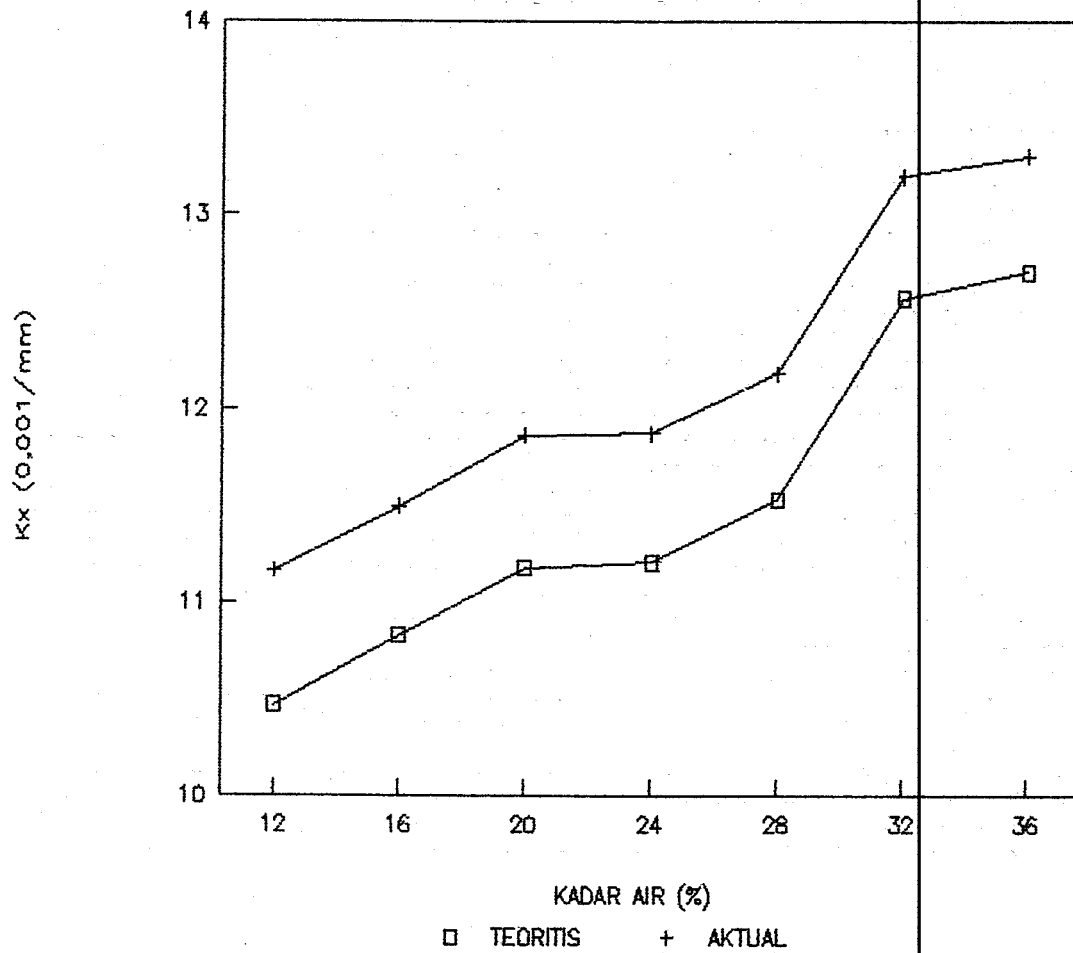
Gambar 4.12. Perbandingan Regangan Laminat -30/0/30

4.3.6.3. Kelengkungan Arah X

a. Orientasi sudut $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ Gambar 4.13. Perbandingan kelengkungan laminat $0^\circ/90^\circ/0^\circ$

b. Orientasi sudut $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$

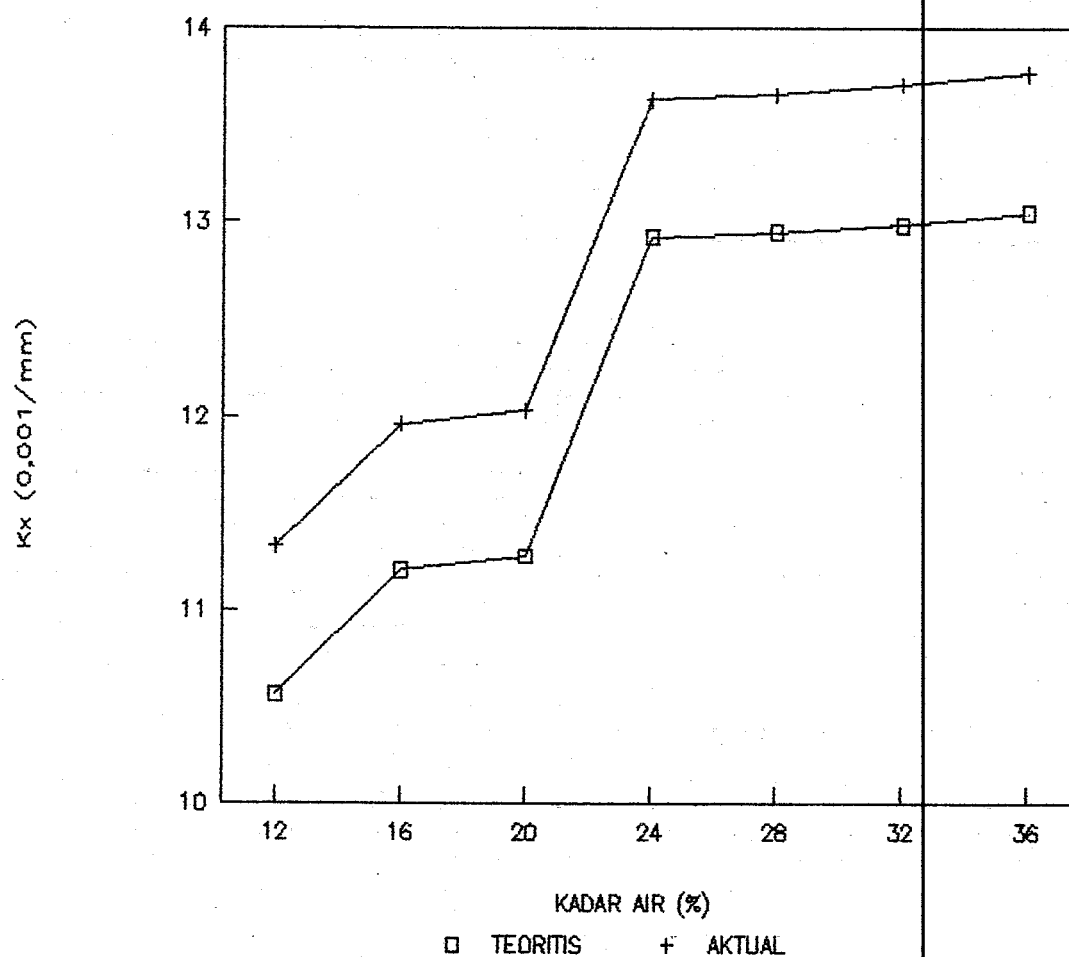
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
-60/90/60



Gambar 4.14. Perbandingan kelengkungan laminat $-60^{\circ}/90^{\circ}/60^{\circ}$

c. Orientasi sudut $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$

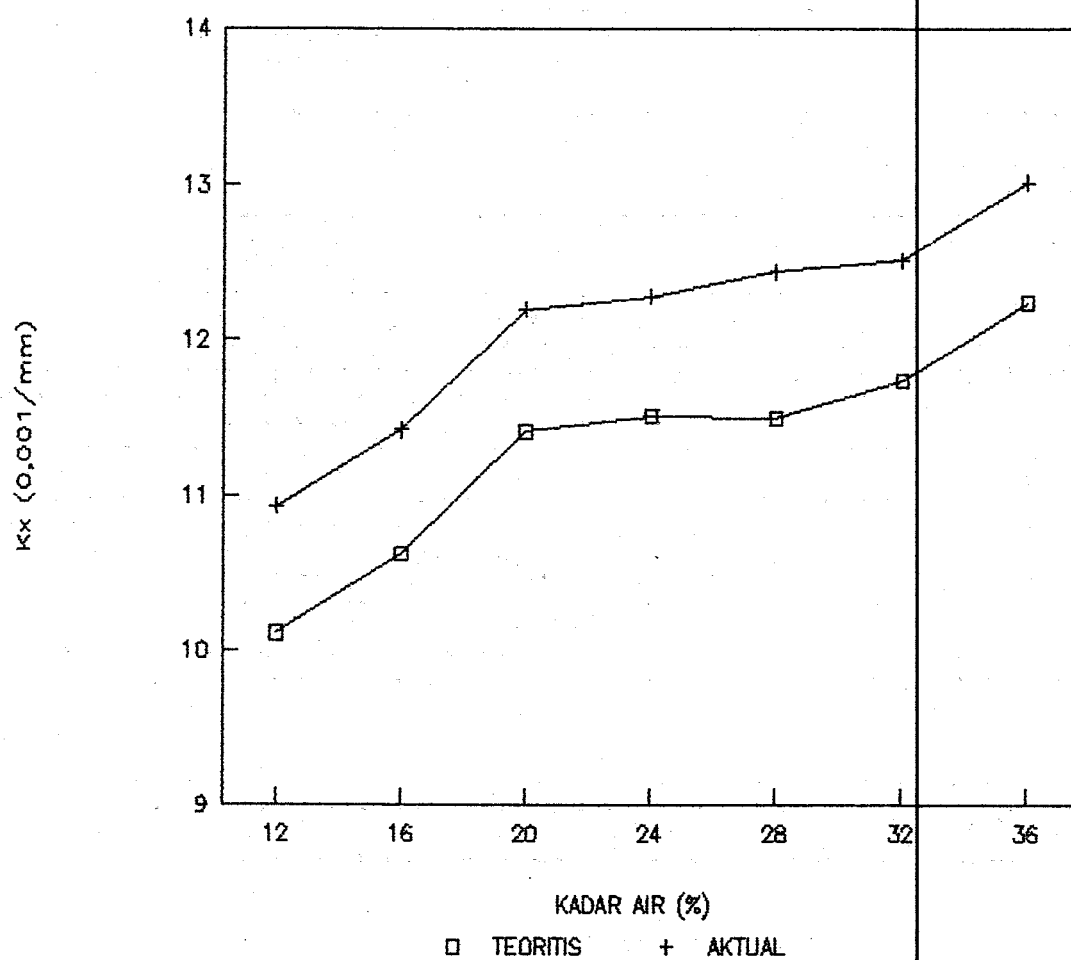
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X $-45/90/45$



Gambar 4.15. Perbandingan kelengkungan laminat $-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$

d. Orientasi sudut $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$

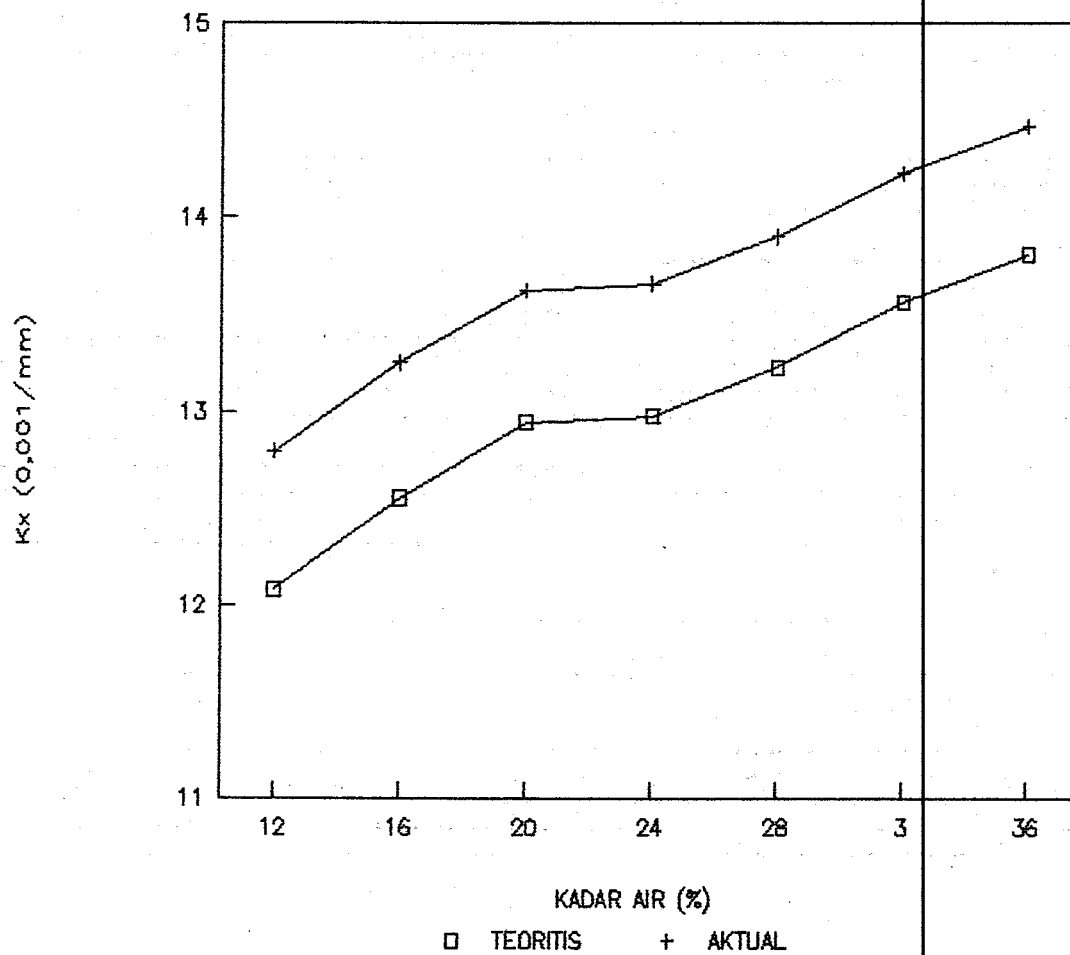
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
-30/90/30



Gambar 4.16. Perbandingan kelengkungan laminat $-30^{\circ}/90^{\circ}/30^{\circ}$

e. Orientasi sudut $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$

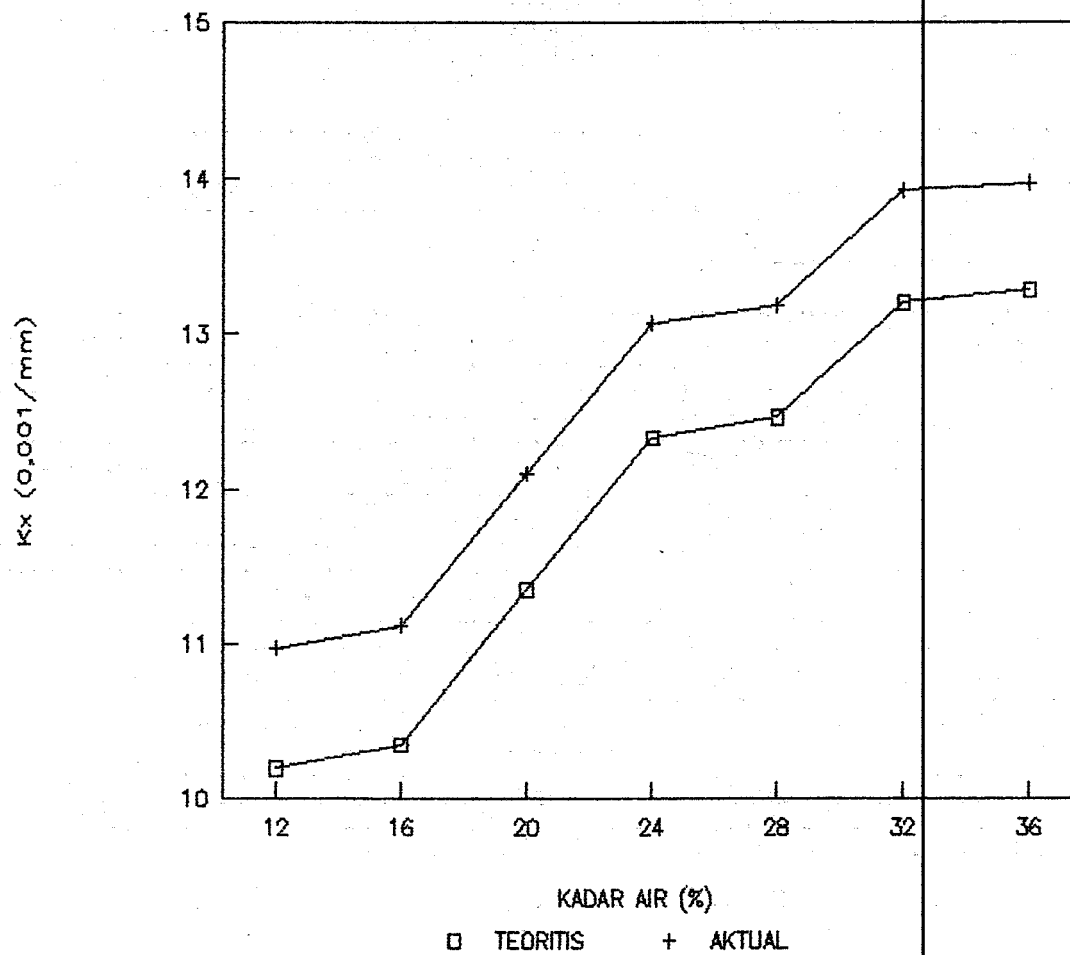
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
90/0/90



Gambar 4.17. Perbandingan kelengkungan laminat $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$

f. Orientasi sudut $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$

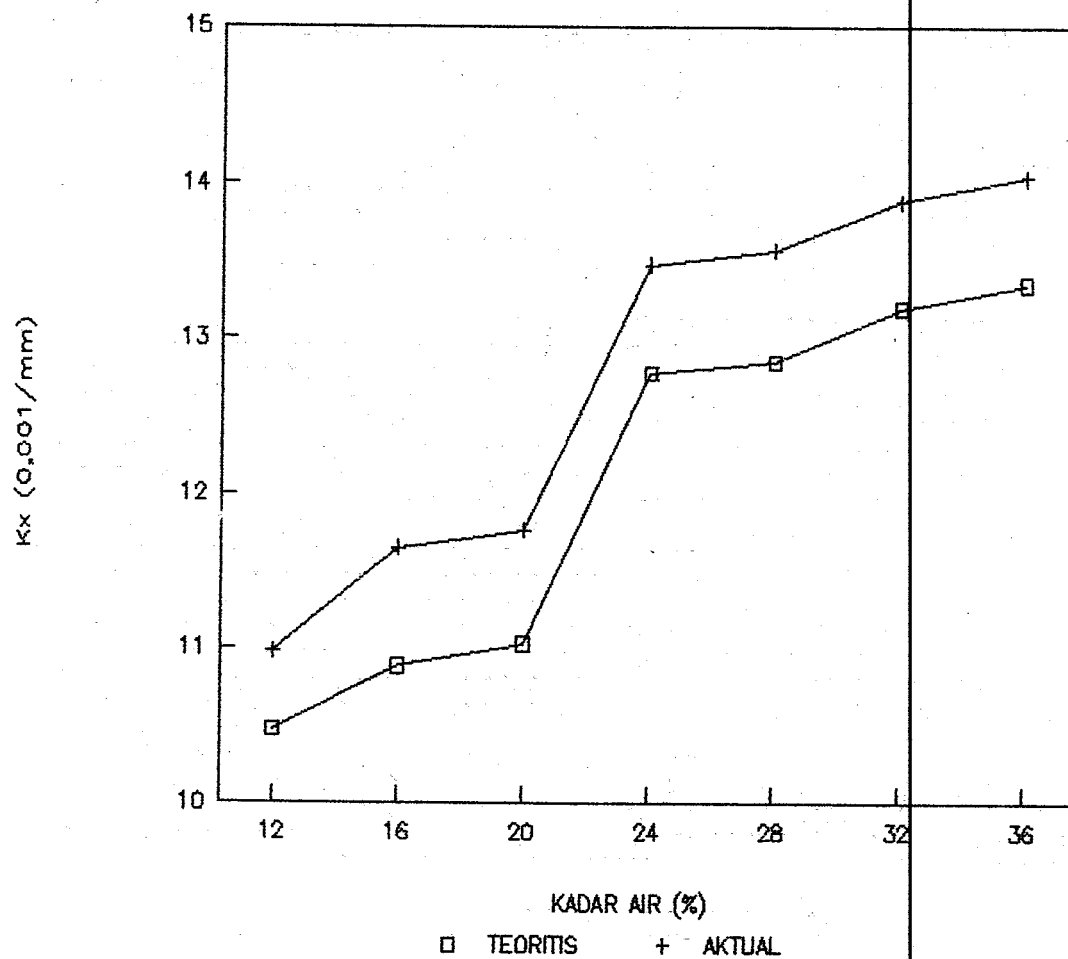
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
-60/0/60



Gambar 4.18. Perbandingan kelengkungan laminat $-60^{\circ}/0^{\circ}/60^{\circ}$

g. Orientasi sudut $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$

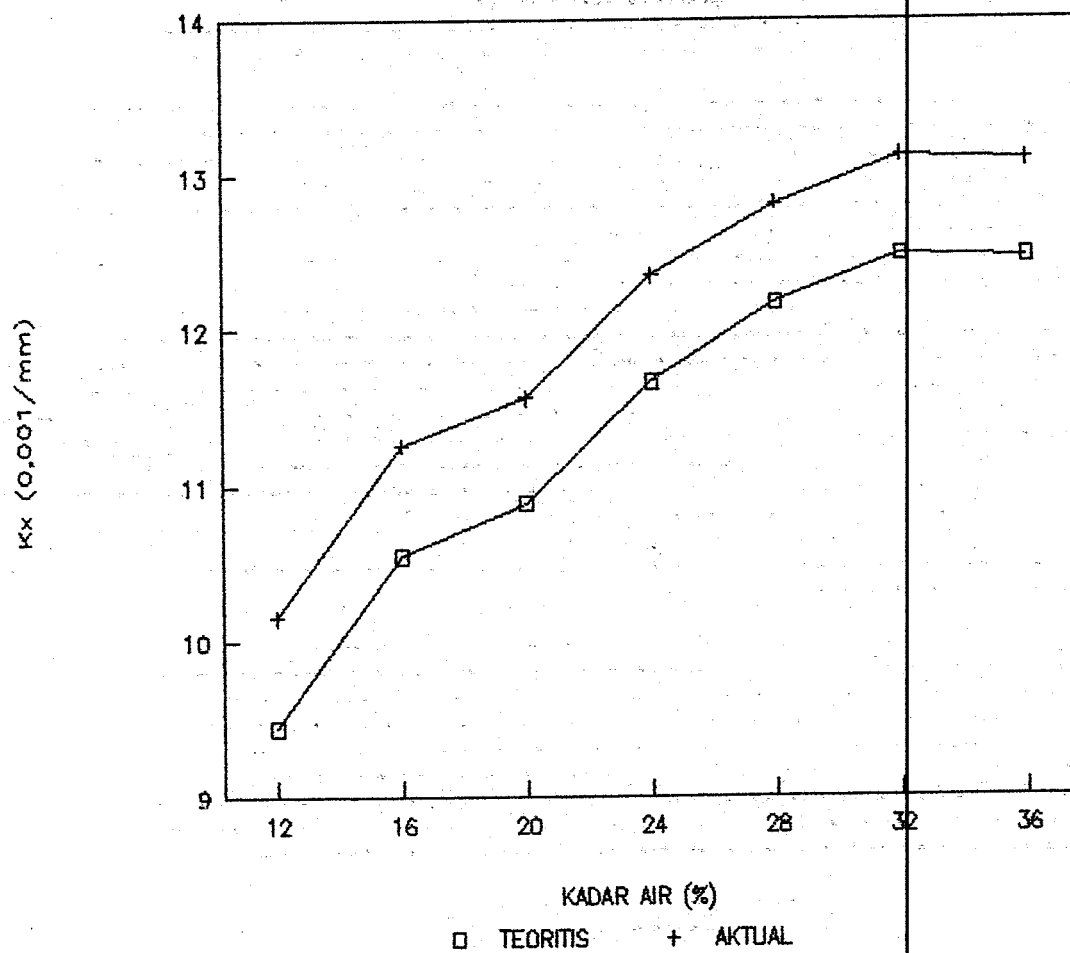
PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
-45/0/45



Gambar 4. 19. Perbandingan kelengkungan laminat $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$

h. Orientasi sudut $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$

PERBANDINGAN KELENGKUNGAN ARAH X
-30/0/30



Gambar 4.20. Perbandingan kelengkungan laminat $-30^{\circ}/0^{\circ}/30^{\circ}$

BAB 5

DISKUSI

Pada bab ini membahas hasil penelitian yang telah dilakukan, baik melalui perhitungan teoritis, maupun pengujian. Selain itu juga dibahas sejauh mana pengaruh higrothermal terhadap sifat mekanik material. Perubahan orientasi sudut serat juga dibahas dalam bab ini. Hal lain yang dibahas adalah mengenai permasalahan yang timbul selama pelaksanaan penelitian dan mengenai adanya perbedaan dari hasil pengujian dan perhitungan teoritisnya.

Dari pembuatan veneer yang dilakukan, dalam perhitungan diasumsikan memiliki ketebalan yang sama, yaitu 3 mm untuk semua lapisan tripleks. Perubahan orientasi sudut serat utamanya dicoba pada kedua lapisan luar. Ini dilakukan karena veneer pada bagian terluar untuk tripleks memiliki kualitas yang lebih baik daripada bagian dalamnya. Jenis kayunya yang berbeda, maupun kondisi kayu itu sendiri.

Kondisi serat kayu pada penelitian ini diasumsikan searah dan kontinu. Pendekatan semacam ini adalah

pendekatan yang paling sesuai untuk kondisi kayu veneer, walaupun seringkali ditemukan cacat kayu. Karena serat-serat ini sudah tersusun dalam veneer, maka pengaturan serat secara hand lay-up tidak dapat dilakukan.

Kerusakan pada veneer sewaktu proses produksi awal (pengupasan) seringkali terjadi. Utamanya adalah terjadi pecah pada posisi transversal. Pecah-pecah semacam ini diakibatkan kurang sempurnanya proses pengupasan (rotary lathe). Bisa jadi karena pengupasan terlalu tipis akibat setting yang kurang benar, atau karena keausan pada pisau pengupas.

Pada pemberian lem pada veneer kurang merata akan mengakibatkan terjebaknya gelembung udara di dalam lapisan. Untuk mengatasi hal ini, maka perlu dilakukan pengontrolan setiap saat agar kualitas pengeleman yang dilakukan berhasil baik. Kalau perlu dilakukan penekanan agar lem dapat melekat sempurna.

Penekanan dingin dan panas bertujuan untuk meningkatkan daya lekat lem dan resapannya dalam lapisan veneer, dengan tujuan agar terbentuk ikatan yang kuat antara masing-masing serat tepi lamina. Selain dihitung lamanya penekanan, juga perlu diperhatikan besar tekanan

yang diberikan. Penekanan dingin bertujuan untuk meratakan veneer dan peresapan lem, serta penekanan dingin akan membantu mempercepat proses pengeringan lem sekaligus materialnya. Penekanan dingin yang terlalu pendek akan menyebabkan kurangnya absorpsi lem oleh lamina, sehingga penempelan hanya terjadi pada lapisan terluar. Sedangkan penekanan panas yang terlalu lama dan tekanan terlalu besar akan menyebabkan material melengkung akibat serat lapisan tengah tertarik oleh serat lapisan luar. Penjelasannya yaitu jika lamina terluar terlalu kering akibat penekanan panas, maka akan menyusut. Penyusutan ini akan berbeda dengan penyusutan lamina tengahnya (core). Penyusutan inilah yang menyebabkan material melengkung.

Pada saat perendaman plywood ke dalam air, memiliki waktu yang berbeda untuk masing-masing kadar air. Secara rata-rata dari pengamatan di lapangan, semakin tinggi kadar air akan semakin membutuhkan waktu yang lama untuk perendaman. Jadi kenaikan kadar air akan berfungsi linier terhadap waktu. Permasalahan yang timbul :

- a. Penyebaran kadar air yang tidak merata (dalam hal ini dilakukan pendekatan rata-rata di beberapa titik pada spesimen).
- b. Penyebaran temperatur yang tidak merata (pendekatan

juga sama).

Pada pengujian tarik, yang didapatkan hanya besarnya beban untuk mematahkan spesimen, yang merupakan besarnya beban sebagai akibat gaya dari luar. Sedangkan untuk gaya akibat perubahan temperatur, dalam referensi disebutkan bahwa akan terjadi regangan jika terjadi perubahan temperaturnya. Dalam hal ini, dengan mengacu pada produk yang ada, plywood produk rata-rata memiliki kadar air 12%. Untuk itu diasumsikan kondisi awal sebelum terjadi perubahan temperaturnya adalah pada saat kadar air 12%. Jadi dengan kenaikan kadar airnya akan menurunkan temperatur, yang otomatis akan memberikan harga gaya thermal searah sumbu X bernilai negatif karena ΔL yang terjadi mempunyai harga negatif. Demikian juga yang searah dengan sumbu Y. ΔL yang terjadi merupakan hasil pengukuran, karena hanya diperlukan gaya maksimal untuk mencari regangan maksimal.

Regangan bidang tengah pada komposit merupakan rata-rata dari regangan masing-masing lamina. Jadi dalam perhitungan ini perhitungan regangan bidang tengah komposit laminat dianggap mewakili regangan material komposit laminat secara keseluruhan. Hasil akhir perhitungan yang merupakan regangan bidang tengah,

sedangkan untuk regangan lamina tidak dibahas pada penelitian ini.

Regangan antara hasil pengujian dan perhitungan tarik pada dasarnya memiliki kecenderungan yang sama. Tingkat kejenuhan plywood dengan pembentuk material meranti merah (*Shorea Spp. Div.*) berada di antara 28% sampai dengan 32% kadar air. Dan kekuatan tarik serta regangan tertinggi berada di daerah tersebut. Perbedaan yang terlihat pada hasil pengujian dan perhitungan regangan (gambar 4.5. sampai dengan gambar 4.12.) antara lain diakibatkan oleh :

- a. Serat yang tidak lurus dan kontinu serta terpotong oleh mata kayu ataupun terputus.
- b. Veneer yang terpecah secara aksial.
- c. Perbedaan jenis kayu veneer pada potongan radial.
- d. Adanya gelembung udara yang terperangkap.
- e. Banyak terjadi notch akibat proses pemotongan.

Secara umum pada gambar 4.1. dan 4.2. terlihat bahwa besarnya tegangan yang terjadi pada masing-masing laminat akan semakin dengan bertambahnya kadar air laminat. Nilai tertinggi tegangan juga dicapai pada kondisi kadar air antara 28% sampai 32%, setelah itu tegangan akan turun lagi. Demikian juga terhadap regangan

bidang tengah akan turun lagi setelah kadar air tersebut.

Adanya regangan bidang tengah kayu disebabkan karena adanya resultan pada material. Gaya-gaya ini adalah terdiri dari gaya thermal, higroskopis maupun pembebanan dari luar.

Dalam pengujian bending, besarnya gaya pembebanan yang terjadi merupakan beban ultimate. Beban ini mudah dicari karena langsung tertera pada skala penunjuk. Sedangkan besarnya defleksi yang terjadi juga sudah tertera dalam penunjuk. Tetapi kesulitan utamanya adalah menentukan sampai di mana spesimen uji dinyatakan rusak setelah menerima beban maksimal. Dengan pendekatan bahwa defleksi maksimal didapatkan setelah pembebanan konstan terjadi selama beberapa detik. Berdasarkan standart uji ASTM 790M-93, pangujian dinyatakan memenuhi, karena besar regangan yang terjadi pada setiap pengujian bending tersebut tidak melebihi 0,05 mm/mm.

Pada gambar 4.3. dan 4.4. terlihat bahwa kondisi material kayu lapis akan semakin melemah dengan semakin bertambahnya kadar air. Besarnya tegangan yang diperlukan sampai material dapat dinyatakan rusak/patah akan semakin kecil walaupun defleksi yang terjadi akan semakin besar.

Karena besar defleksi yang terjadi semakin besar, maka curvature akan semakin mengecil pula. Kelengkungan / kelenturan akan semakin besar (pada gambar 4.13. sampai 4.20). Ini disebabkan karena memang kondisi serat yang mengembang akibat pertambahan kadar airnya akan semakin mudah melengkung. Dalam referensi buku "Bangunan Kayu Indonesia" dapat dilihat bahwa perbedaan jenis kayu dari kayu basah dan kering akan berbeda sampai 70,5 %.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dapat diambil kesimpulan :

1. Kekuatan tarik dan bending akan menurun jika terjadi perubahan orientasi sudut seratnya, baik itu core maupun face dan backnya. Dari beberapa alternatif orientasi sudut yang disajikan, kondisi terbaik untuk pembebanan tarik dan bending dicapai laminat orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$.
2. Semakin tinggi kadar air laminat Meranti Merah, maka :
 - a. Kekuatan tarik akan meningkat sampai kadar air 28% sampai 32%, setelah itu akan turun lagi.
 - b. Kekuatan bending akan semakin turun dengan bertambahnya kadar air.
3. Nilai regangan dan kelengkungan laminat Meranti Merah:
 - a. Nilai regangan akan semakin besar terhadap kenaikan kadar air sampai batas antara 28% sampai 32%, setelah itu akan turun lagi.
 - b. Kelengkungan akan semakin besar terhadap kenaikan kadar airnya.
4. Terjadi perbedaan antara hasil pengujian dan hasil perhitungan teoritis, hal ini dimungkinkan karena kurang sempurnanya spesimen uji dan pengujian, serta pembatasan-pembatasan permasalahan.

Saran :

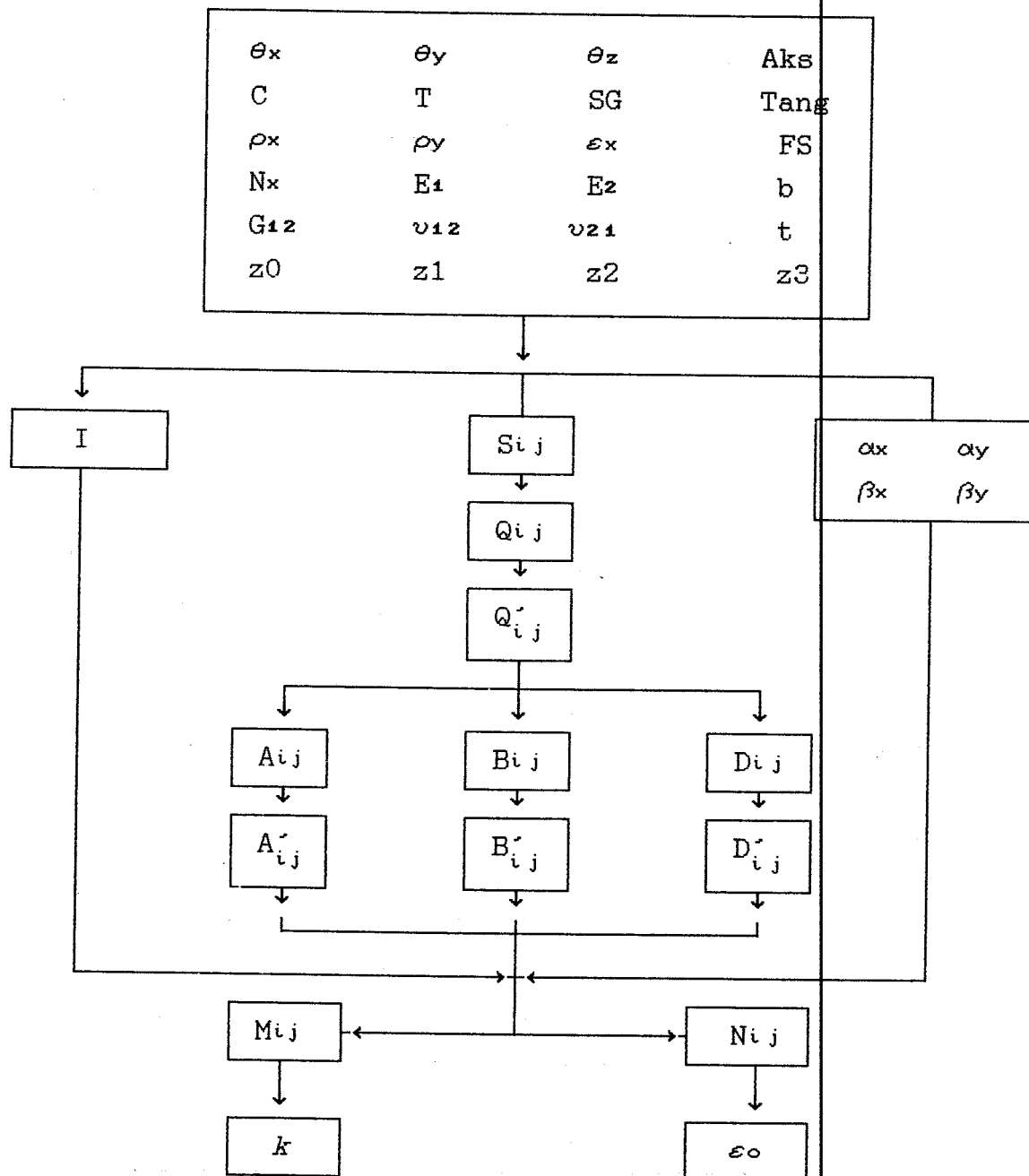
1. Dalam proses pengupasan hendaknya diperhatikan betul kondisi pisau lathe agar veneer yang dihasilkan bermutu baik.
2. Hendaknya pada saat penekanan dingin dan panas, baik lamanya, besar tekanan maupun panasnya disesuaikan dengan dimensi kayu lapis.
3. Kadar air dan temperatur pengujian sebisa mungkin disamakan disetiap titik.
4. Sebisa mungkin didapatkan spesimen dengan material pembentuk kayu dari spesies dan jenis yang sama (dari satu pohon).
5. Pemilihan veneer yang baik, tidak terpecah, tidak terdapat mata kayu serta sama jenis kayunya.

DAFTAR PUSTAKA

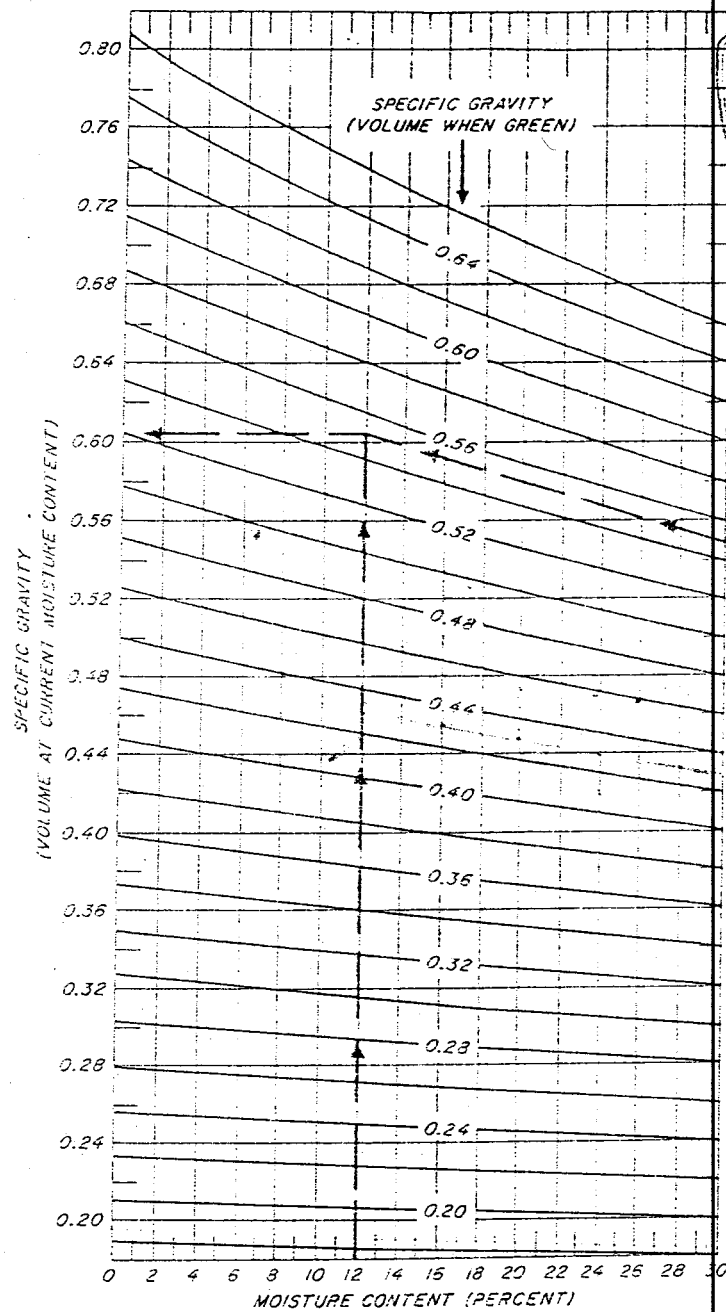
1. Gibson, Ronald F, *Principle of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill Book Co, Singapore, 1994.
2. D 3500 - 90, *Standard Test Methods for Structural Panels in Tension*, Annual Book of ASTM Standard, 1994.
3. D 790M - 93, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Pastics and Electrical Insulating Materials*, Annual Book of ASTM Standard, 1994.
4. D 3040 - 87, *Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure*, Annual Book of ASTM Standard, 1994.
5. Kamil, Sulaiman, *Struktur Komposit*, Jurusan Teknik Penerbangan ITB, Bandung, 1994.
6. Dietrich, Fengel and Gerd Wegener, *Wood : Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, University of Munich, 1995.
7. *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material*, Forest Product Laboratory, US Department Agriculture, 1974.
8. Sutikno, Paribroto, *Pengujian Kayu Lapis*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan, Bogor, 1986.

- | | |
|---|------------|
| 9. Jane and Bodig, <i>Mechanics of Wood Composites.</i> | and Wood |
| 10. <i>Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia,</i> | Departemen |
| Industri, 1961. | |




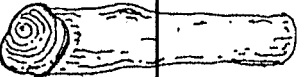
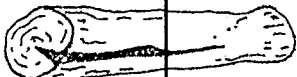

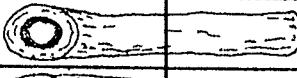
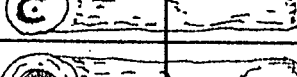
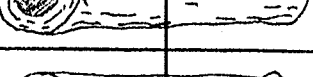
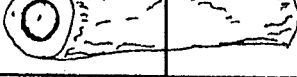


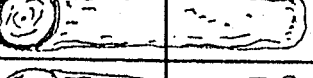
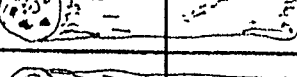
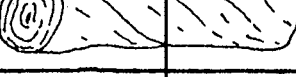
DIAGRAM ALIR PERHITUNGAN KOMPOSIT LAMINAT



TABEL A DENSITAS KAYU



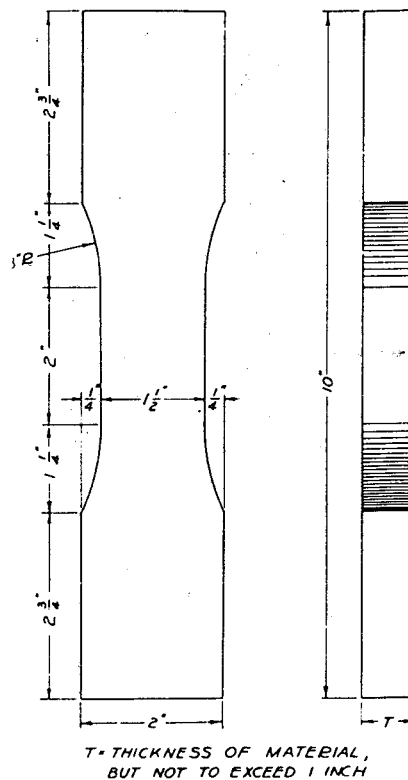
TABEL B JENIS-JENIS CACAT KAYU

No	keterangan	gambar
1	Kayu bengkok 1/3 bagian atau lebih	
2	Kayu bengkok 2 kali atau lebih	
3	Kayu busuk atau hati 1/3 bagian atau lebih	
4	Hati kayu atau empulur miring	
5	Kayu pecah yang panjangnya 1/3 bagian atau lebih	
6	Mata kayu besar atau mati 3 buah atau lebih	
7	Pecah gelang	
8	Pecah busur	
9	Hati kayu berlubang diatas 6"	
10	Empulur atau hati kayu besar	
11	Lonjong atau tidak silindris 1/3 bagian atau lebih	
12	Kantong damar	
13	Teras kayu yang busuk maksimum 5 cm	
14	Lubang ulat	
15	Serat melingkar	

**PERHITUNGAN MODULUS ELASTISITAS, POISSON RATIO
DAN MODULUS GESER**

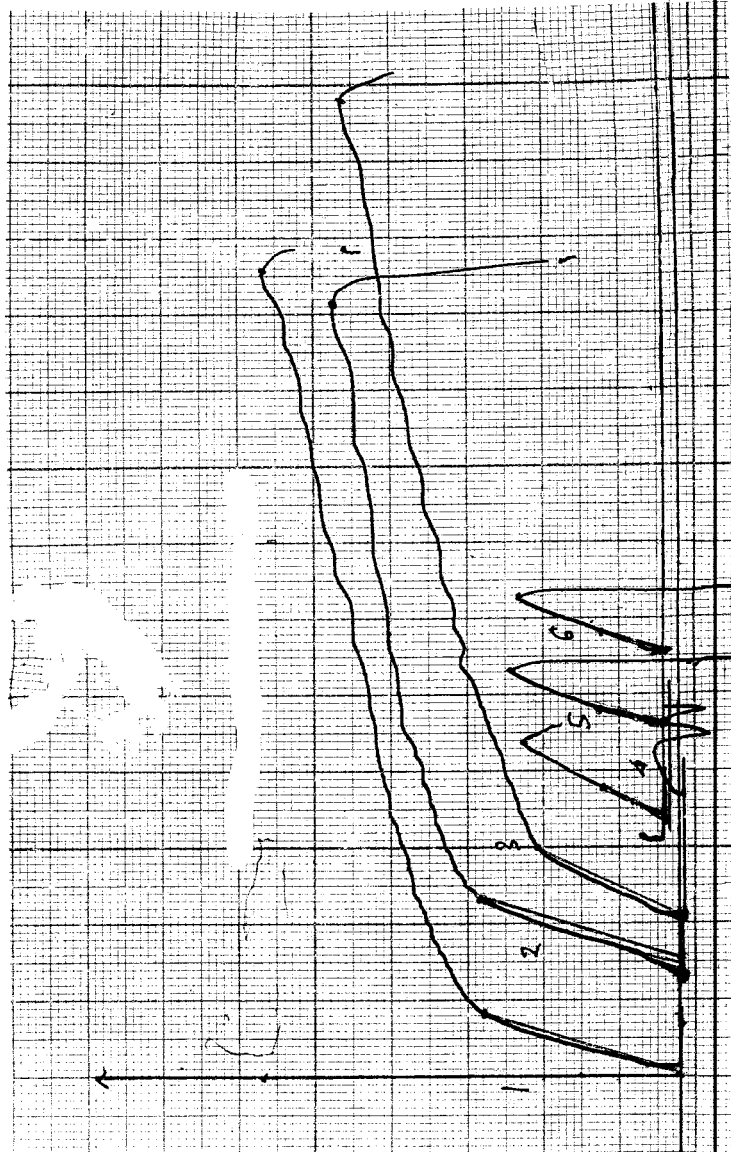
Pengujian yang dilakukan mengacu pada standart ASTM D 1037-93. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya Modulus Elastisitas, Poisson Ratio dan Modulus Geser material Meranti Merah sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan regangan dan kelengkungan yang terjadi.

Spesimen yang digunakan sama, baik untuk serat sejajar dengan sumbu maupun tegak lurus, dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar Lampiran 4.1. Spesimen Uji

Dari enam pengujian yang dilakukan didapatkan grafik pengujian sebagai berikut :



Gambar Lampiran 4.2. Grafik Hasil Pengujian

Dengan perhitungan sebagai berikut :

Diket : Spesimen I

$P_u = 2780$ kg, dalam grafik tercantum 55 satuan
kotak

$L_l = 41,61$ mm, maka ΔL adalah 1,65 mm dalam

grafik tercantum 106 satuan, ΔL
masing-masing kotak mewakili 0,0156 mm.

Maka masing-masing kotak mewakili :

$$P = 50,5450 \text{ kg}$$

$$\Delta L = 0,0156 \text{ mm.}$$

Dengan pendekatan bahwa terjadi Yield Point saat regangan 0,35 %, maka terlihat dari grafik bahwa :

$$P_y = 26 \text{ kotak}$$

$$= 1314,1700 \text{ kg}$$

$$\text{Tegangan yield terjadi } (\sigma_y) = P / A$$

$$= 2,9687 \text{ kg/mm}^2$$

$$\Delta L = 8 \text{ kotak}$$

$$= 0,1245 \text{ mm}$$

$$\text{Regangan yield terjadi } (\epsilon_y) = \Delta L / L_0$$

$$= 0,1245 / 39,96$$

$$= 0,0031 \text{ mm/mm}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil pengujian sebagai berikut :

HASIL PENGUJIAN TARIK

Properti	Sejajar Serat				Tegak Lurus serat	
	1	2	3	4	5	6
Tebal b (mm)	18,6	18,2	16,6	19,6	19,2	19,8
Lebar d (mm)	23,8	23,6	23,5	23,8	23,7	23,45
Gauge Lo (mm)	39,93	39,98	40,04	40,63	40,15	40,7
Li (mm)	41,61	41,36	41,25	40,74	40,27	40,87
Luas (mm ²)	442,68	429,52	340,1	466,48	455,04	464,31
P ult (kg)	2780	2300	2235	602	816	725
P yield (kg)	1314,17	1300	943,67	271,0967	271,0967	322,186
Teg ult (kg/mm ²)	6,2800	5,3550	5,73	1,2905	1,2905	1,5615
Teg yield (kg/mm ²)	2,9700	3,0300	2,42	0,5812	0,7552	0,6982
Ly (mm)	0,1245	0,1272	0,1018	0,05598	0,0442	0,0611
Lu (mm)	1,65	1,38	1,21	0,11	0,12	0,17
y (mm/mm)	0,0031	0,0032	0,0025	0,0014	0,0011	0,0015
u (mm/mm)	0,0413	0,0345	0,0302	0,0028	0,0029	0,0041

Tabel Lampiran 4.1. Hasil pengujian tarik

Untuk rata-ratanya ditemukan sebagai berikut :

1. Tegangan sejajar serat : 2,76845592 kg/mm²
2. Regangan sejajar serat : 0,00291009 kg/mm²
3. Tegangan tegak lurus serat : 0,69368733 kg/mm²
4. Regangan tegak lurus serat : 0,00137784 kg/mm²

Modulus Elastisitas adalah sebagai berikut :

1. $MOE_1 = \frac{Teg_1}{Reg_1} = \frac{2,76845592}{0,00291009} = 951,33 \text{ kg/mm}^2$
2. $MOE_2 = \frac{Teg_2}{Reg_2} = \frac{0,69368733}{0,00137784} = 503,46 \text{ kg/mm}^2$

Perhitungan Poisson Ratio tidak dapat dilakukan secara langsung dari hasil pengujian. Jadi dilakukan pendekatan. Dengan pendekatan bahwa nilai regangan akibat pengecilan penampang pada pengujian sejajar serat adalah mendekati negatif regangan tegak lurus serat, maka perhitungan Poisson Ratio didapatkan sebagai berikut :

3. $\nu_{12} = \frac{Reg_2}{Reg_1} = \frac{0,00137784}{0,00291009} = 0,4734$
4. $G_{12} = \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu_{12})} = \frac{951,33}{2 \cdot (1 + 0,4734)} = 325,0023 \text{ kg/mm}^2$

Angka Poisson Ratio yang dihasilkan mendekati rata-rata Poisson Ratio dari beberapa material kayu yang tercantum di referensi Wood Handbook.